

Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système

Version expérimentale

Ouvrage collectif AFIS
préparé par le Groupe de Travail Ingénierie Système



Version 3 - 12 02 2009



© **AFIS**, 2007.

Association Française d'Ingénierie Système
Parc Club Orsay
32, Rue Jean Rostand
91893 ORSAY Cedex – France

Serveur web : www.afis.fr

Tous les noms de sociétés ou de produits cités dans ce document sont utilisés à des fins d'identification et sont les marques de leurs détenteurs respectifs.

Note au lecteur

Découvrir et comprendre l'ingénierie système est le produit d'un travail collectif de l'AFIS.

Ce document a été initialisé, conçu et rédigé, dans le contexte du groupe de travail Ingénierie Système (GT IS), par son animateur, Serge Fiorèse, assisté de Jean-Pierre Meinadier qui en a, pour une grande part, assuré les rédactions successives.

Il a fait l'objet de multiples versions, en fonction de la prise en compte, au fur et à mesure de leurs parutions, des travaux des groupes de travail de l'AFIS, des nombreuses relectures et contributions apportées par les groupes de travail ou des adhérents de l'AFIS ainsi que des suggestions émanant de retours d'expérience du monde académique.

Parmi les nombreuses contributions, citons celles qui ont eu un apport tout à fait majeur :

- La relecture très complète et rigoureuse de Catherine Laval, qui en fait un co-auteur à part entière, et ses apports concernant les aspects liés au processus d'acquisition et les approches systèmes en général.
- La relecture globale de Jean-Claude Tucoulou, Directeur scientifique, et ses apports sur le management stratégique de projet ainsi que sur « l'économie » de l'IS et des projets, qui a eu des impacts sur toutes les parties de l'ouvrage.

Citons également les apports très significatifs suivants :

- les relectures des premières versions par Gérard Jeanblanc, qui, jouant le candide, a activement participé aux orientations initiales du document,
- la relecture de la partie traitant de modélisation par le groupe de travail Méthodes et outils (GT MO) sous la direction de Françoise Caron,
- la relecture de Patrick Estève sur les aspects techniques et notamment la V & V,
- la relecture de Philippe Révellat pour la gestion de configuration,
- les relectures des versions successives de Rolland Mazzella suggérant de nombreux points à mettre en exergue,
- la relecture finale de Denise Cattan, avec sa vision orientée qualité,
- la relecture de Jacques Valancogne avec une vision maîtrise d'ouvrage et des apports majeurs notamment sur les aspects de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement,
- et enfin l'apport d'Alain Faisandier du fait de ses collaborations antérieures avec l'un des auteurs.

Que tous ces contributeurs ainsi que les autres relecteurs, notamment membres des GT, dont, bien évidemment les membres du GT IS, trouvent également ici la reconnaissance des deux auteurs.

Ce document a enfin bénéficié, tout au long de sa maturation, des suggestions, des remarques et, *in fine*, de la validation du Conseil Scientifique de l'AFIS.

Une version expérimentale, *Découvrir et comprendre l'ingénierie système V2*, avait été mise à la disposition des adhérents en décembre 2006.

Cette nouvelle version plus étoffée, *Découvrir et comprendre l'ingénierie système V3*, offre des compléments majeurs à la version précédente et tient compte des retours qu'elle a suscités.

Elle est mise en février 2009 à disposition des adhérents à titre expérimental. Nous serons à nouveau attentifs à leurs remarques et suggestions (jean-pierre.meinadier@afis.fr).

L'AFIS a décidé en décembre 2008 de se doter d'un référentiel. Ce dernier est composé :

- du *Systems Engineering Handbook* de l'INCOSE, qui fournit l'aspect référentiel proprement dit, avec l'avantage d'une reconnaissance internationale,
- de *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*, qui en fournit l'approche pédagogique et représente l'ouvrage de référence AFIS en matière d'enseignement et formation.

La prochaine version de *Découvrir et comprendre l'ingénierie système* tiendra compte des remarques des adhérents et proposera un appareil plus complet, permettant notamment de l'utiliser conjointement avec l'*INCOSE Systems Engineering Handbook V3.1*.

Ce document est protégé par copyright AFIS. Néanmoins, comme tout document technique AFIS, ce document est libre d'usage pour les adhérents AFIS et au sein de leur organisme d'appartenance, la seule restriction étant alors que la source AFIS soit systématiquement citée ou apparaisse dans toute copie ou extraction du document.

Sommaire

PROPOS 14

1 : DU SYSTEME AU PROJET 20

1 Présentation 24

- .1 Les deux types de systèmes considérés par l'IS 24
- .2 Les points de vue adoptés 26

2 Le système à faire : le système étudié 28

- .1 Préalable : le système 28
- .2 Le système : Vue externe 28
 - .2.1 Aspects contextuels 29
 - .2.1.1 *Le système a une finalité.* 29
 - .2.1.2 *Le système est « plongé » dans un environnement.* 29
 - .2.2 Aspects temporels externes 32
 - .2.2.1 *Le système a un Cycle de Vie* 32
 - .2.2.2 *Pendant l'exploitation, le système peut avoir divers états et comportements.* 33
 - .2.2.3 *Le système a besoin de systèmes contributeurs* 35
 - .2.3 Le système est piloté 37
 - .2.4 Synthèse : vue externe du système et ingénierie système 38
- .3 Le système : Vue interne 40
 - .3.1 Aspects structurels internes 41
 - .3.1.1 *Le système se décompose de manière itérative* 41
 - .3.1.2 *Décomposition et Architecture du système* 42
 - .3.1.3 *Conception de l'architecture du système* 42
 - .3.1.4 *Le fonctionnement des éléments du système doit être piloté* 42
 - .3.2 Aspects temporels internes 43
 - .3.2.1 *Le système met en œuvre des scénarios de fonctionnement.* 45
 - .3.2.2 *Les transitions sont commandées* 45
 - .3.3 Le système se pilote 45
 - .3.4 Synthèse : vue interne du système et ingénierie système 46

3 Le système pour faire le système étudié : Le projet 48

- .1 Préalable : le projet est un système 49
- .2 Le Projet : Vue externe 50
 - .2.1 Aspects externes 51
 - .2.1.1 *Le Projet répond à une finalité* 51
 - .2.1.2 *Le Projet est plongé dans un environnement.* 52
 - .2.2 Aspects temporels externes 53
 - .2.2.1 *Le Projet a un cycle de vie* 53
 - .2.2.2 *Le Projet a besoin de systèmes contributeurs* 57
 - .2.3 Le Projet est piloté 57
 - .2.4 Synthèse sur la vue externe du projet 58
- .3 Le Projet : Vue interne 59

.3.1	Aspects structurels internes	59
.3.1.1	<i>Problématique générale de décomposition d'un projet</i>	59
.3.1.2	<i>Problématique de décomposition d'un projet de développement de système</i>	60
.3.1.3	<i>Le projet se décompose de manière itérative</i>	61
.3.1.4	<i>Composition et organisation du projet</i>	62
.3.2	Aspects temporels internes	62
.3.2.1	<i>L'approche temporelle du projet de développement d'un système : cycle de vie et processus</i>	62
.3.2.2	<i>Scénarios d'enchaînement de tâches et ordonnancement du réseau de tâches</i> ...	64
.3.2.3	<i>Les transitions des scénarios d'enchaînement des tâches doivent être commandées</i>	64
.3.3	Le Projet est piloté	65
.3.4	Synthèse sur la vue interne du projet	66
.4	Ingénierie système et Projet de développement	67
.4.1	L'ingénierie système est une aide pour faire l'ingénierie du projet	67
.4.2	Management de l'IS et management de projet	67

2 : LE SYSTEME REpond A UNE FINALITE..... 69

4 Préalable : presentation des concepts..... 73

.1	Du besoin à satisfaire au problème à résoudre	73
.2	Les parties prenantes	74
.2.1	Typologie des parties prenantes	74
.2.2	Parties prenantes, besoins, contraintes et exigences	75
.3	Cadrage du besoin et du problème	76

5 Le besoin opérationnel..... 78

.1	L'approche du besoin	78
.1.1	Les besoins fonctionnels	78
.1.1.1	<i>Missions, concepts d'opération, scénarios opérationnels</i>	78
.1.1.2	<i>Services rendus et scénarios de comportement</i>	78
.1.1.3	<i>Scénarios et fonctions logistiques</i>	79
.1.2	Les contraintes de l'environnement	79
.2	La démarche d'expression et de spécification du besoin	79
.2.1	L'expression du besoin	80
.2.1.1	<i>Etudes amont</i>	80
.2.1.2	<i>Analyse de l'existant</i>	80
.2.1.3	<i>Le recueil des besoins des parties prenantes</i>	81
.2.1.4	<i>L'analyse des fonctions rendues par le système</i>	81
.2.1.5	<i>Caractérisation de l'environnement et études d'impact</i>	82
.2.2	La formalisation du besoin : le cahier des charges	82
.2.2.1	<i>La formalisation des besoins fonctionnels</i>	82
.2.2.2	<i>La formalisation des contraintes</i>	83
.2.2.3	<i>Hierarchisation et flexibilité des besoins et contraintes</i>	83

6 L'Ingénierie des exigences 85

.1	Principes	85
.1.1	Concepts de spécification et d'exigences système	85
.1.2	Définition et caractéristiques des exigences	85
.1.3	Généralisation de la notion d'exigences	86

.2	Spécification des exigences système.....	87
.2.1	Formalisation des exigences initiales.....	87
.2.2	Spécification des exigences système	87
.2.3	Typologie des exigences.....	89
.3	Référentiels d'exigences	90
.4	Management des exigences.....	91
.4.1	Gestion et traçabilité des exigences	91
.4.2	Vérification et validation des exigences	93
.4.2.1	<i>Vérification et validation des référentiels d'exigences.....</i>	<i>93</i>
.4.2.2	<i>Vérification et validation du système</i>	<i>93</i>
.4.3	Maturité des exigences	94

3 : LA SOLUTION = LE SYSTEME REALISE 96

7 Préalable 100

8 Le système réalisé est le résultat d'une conception..... 101

.1	Le système repose sur une composition d'éléments en interaction.....	102
.1.1	Composition fonctionnelle et physique.....	102
.1.2	Arborescences système et arborescence produit.....	103
.1.3	Allocation des exigences et traçabilité	104
.1.4	Interfaces.....	106
.1.5	Critère d'arrêt des décompositions	108
.2	Le système a une architecture	110
.2.1	Architecture logique (ou fonctionnelle).....	110
.2.2	Architecture physique.....	112
.2.2.1	<i>Aspects de l'architecture physique.....</i>	<i>112</i>
.2.2.2	<i>Conception physique, évaluations, optimisation</i>	<i>113</i>
.2.3	La définition du système.....	115
.3	Le système inclut des acteurs humains	117
.3.1	Complémentarité entre composante humaine et composante technologique.....	117
.3.2	Introduction aux systèmes socio-techniques	118
.3.3	Prise en compte de l'ergonomie dans la conception des systèmes	119

9 Le système est intégré, vérifié, validé, qualifié et produit..... 122

.1	Introduction à la production du système.....	122
.2	Principe de l'IVVQ	122
.2.1	Définition des opérations d'l'IVV	122
.2.2	Mise en oeuvre de l'IVV	123
.2.3	La Qualification.....	125

Le système a une vie opérationnelle..... 127

.1	Introduction à la vie opérationnelle.....	127
.2	Le système est préparé pour être mis en service	127
.3	Le système est exploité et utilisé.....	128
.4	Le système est maintenu en condition opérationnelle	128
.4.1	Le besoin de maintien en condition opérationnelle	128
.4.2	La maintenance des systèmes.....	129

.4.3	Le soutien logistique intégré.....	130
.5	Le système est retiré du service.....	132

4 : INGENIERIE SYSTEME..... 133

L'IS : Définition..... 139

L'approche processus..... 140

.1	Présentation générale	140
.1.1	Définition et caractéristiques générales des processus.....	140
.1.2	La maîtrise des processus, clé de la qualité	142
.1.3	Typologie des processus à considérer par l'IS	143
.2	Présentation de l'ensemble des processus du cycle de vie du système	144
.2.1	Les processus techniques.....	146
.2.1.1	Les processus techniques de développement.....	146
.2.1.2	Les processus techniques après mise en service.....	151
.2.2	Les processus de management (de projet).....	152
.2.2.1	Le processus générique de management de projet.....	152
.2.2.2	Les processus de management plus spécifiques de l'IS	153
.2.3	Les processus contractuels.....	154
.2.3.1	Le processus contractuel d'acquisition.....	155
.2.3.2	Le processus contractuel de fourniture	155
.2.4	Les processus d'entreprise	156
.3	Compléments sur les processus techniques.....	157
.3.1	Compléments sur les processus de définition du système.....	157
.3.1.1	Le processus de définition des exigences.....	159
.3.1.2	Le processus de conception.....	161
.3.1.3	Les processus d'évaluation et de justification de la conception.....	163
.3.2	Compléments sur les processus génériques d'évaluation et justification	163
.3.2.1	Les activités génériques de vérification et validation	164
.3.2.2	Le processus générique d'évaluation-comparaison (ou d'analyse système).....	166

Les méthodes de l'IS 169

.1	Introduction aux méthodes de l'IS	169
.1.1	Rôle des méthodes et outils méthodologiques	169
.1.2	Besoins en modélisation et typologie des modèles	170
.1.3	Besoin d'intégration des outils et partage des données	173
.1.4	Typologie des méthodes et outils de l'IS.....	174
.2	Les outils de base de l'IS.....	175
.2.1	L'ingénierie des exigences.....	175
.2.2	La gestion de configuration	176
.2.2.1	Du besoin au concept de gestion de configuration	176
.2.2.2	La planification de la gestion de configuration	177
.2.2.3	L'identification des configurations	177
.2.2.4	L'enregistrement des informations de configuration	178
.2.2.5	La maîtrise des évolutions.....	178
.2.2.6	La vérification de la configuration.....	179
.3	Les approches de modélisation d'architecture	179
.3.1	Les modèles de base pour représenter les systèmes	180
.3.1.1	Les modèles sémantiques.....	180

Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système

Version 3 - 12 02 2009

.3.1.2	Les modèles structurels.....	181
.3.1.3	Les modèles comportementaux	181
.3.2	Mise en œuvre de la modélisation systémique en conception	182
.3.2.1	Vision opérationnelle	182
.3.2.2	Vision fonctionnelle (ou logique) interne	183
.3.2.3	Vision organique et physique	185
.3.3	Visions de synthèse des approche de modélisation systémique.....	185
.3.3.1	Synthèse des approches traditionnelles.....	186
	cas des systèmes d'information	187
.3.3.2	L'approche fondée sur SysML.....	188
.3.3.3	Une grille générique d'analyse des systèmes complexes.....	189
.3.3.4	Un cadre pour les systèmes socio-techniques.....	190
.4	La maîtrise des risques	192
.4.1	Les concepts de la maîtrise des risques	193
.4.2	Les activités de management des risques	194
.4.3	Les bases de l'analyse des risques	195
.4.4	Identification et caractérisation des risques	196
.4.5	Estimation des risques	197
.4.6	Les actions de maîtrise	198
.4.7	Le suivi des risques.....	199
.5	Méthodes d'évaluation et d'optimisation	200
.5.1	La caractérisation des mérites d'un système	201
.5.1.1	Les grandes caractéristiques du système observé	201
.5.1.2	L'évaluation des mérites du système	202
.5.2	Estimation des coûts	202
.5.3	Estimation de l'efficacité	203
.5.4	Estimation et prise en compte des risques	204
.6	Méthodes en sûreté de fonctionnement des systèmes	205
.6.1	Problématique de maîtrise des risques appliquée au système en exploitation	206
.6.2	Objectifs et composantes de la sûreté de fonctionnement :	207
.6.3	La chaîne des entraves à la sûreté de fonctionnement	208
.6.4	Les techniques de la sûreté de fonctionnement	209
.6.4.1	La prévision des dysfonctionnements	210
.6.4.2	La prévention des défauts	210
.6.4.3	L'élimination des défauts.....	210
.6.4.4	La tolérance aux défauts et aux pannes	211
.6.4.5	Les démonstrations d'obtention de la sûreté.....	211
.6.5	Les activités de SdF dans le processus d'IS.....	212
.6.6	La maîtrise des risques système en exploitation	213
.6.7	Les normes de sûreté de fonctionnement.....	215
	La mise en œuvre de l'IS	216
.1	Présentation.....	216
.2	Mise en œuvre intégrée de l'ingénierie système.....	217
.2.1	Ingénierie parallélisée	217
.2.2	Ingénierie itérative et progressive	217
.2.3	Ingénierie simultanée (ou concourante)	218
.2.4	Intégration des disciplines	218
.3	Management de projet et de l'IS dans le projet.....	218
.3.1	Vue générale sur le management de projet	218
.3.1.1	Introduction et rappels : Projet, management de projet, ingénierie système	219
.3.1.2	Les concepts du management de projets	220
.3.1.3	La mise en œuvre du management de projet	222

Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système

Version 3 - 12 02 2009

.3.2	Les processus de management de projet et de l'IS dans les projets	225
.3.2.1	Les activités du processus de planification	225
.3.2.2	Les activités de suivi et de maîtrise	227
.3.3	Management stratégique de projet fondé sur un cycle de vie	228
.3.3.1	Management stratégique, acteurs et décision	228
.3.3.2	Management stratégique, cycle de vie et jalonnement	229
.3.3.3	Du cycle de vie aux processus associés	232
.3.3.4	Management des processus d'obtention et justification de la définition	234
.3.3.5	Management des processus de production et qualification industrielle	236
.3.3.6	Management des processus de transfert vers l'utilisation, d'acceptation et de qualification opérationnelle	237
.3.4	Management de programme et processus d'acquisition	238
.3.4.1	Programme et processus d'acquisition d'un système complexe	238
.3.4.2	Un modèle à cinq niveaux pour le management des programmes	239
.3.4.3	Mise en œuvre du modèle à 5 niveaux de management de programme	242
.4	Le management de l'IS dans l'entreprise	243
.4.1	Les processus d'entreprise supports de l'IS	244
.4.1.1	Caractérisation des processus d'entreprise	244
.4.1.2	Impacts des processus d'entreprise sur le déploiement de l'IS	245
.4.2	Déploiement de l'IS dans l'entreprise	246
.4.2.1	Les bases du déploiement	246
.4.2.2	La stratégie de déploiement	247
.4.2.3	L'action de progression	247
.4.3	Modèles de maturité	248
.4.3.1	L'échelle générique de maturité	249
.4.3.2	Le modèle d'évaluation/progression	250

252

1	Bibliographie	253
2	Index	254

Liste des Figures

1 : Structure du document	15
2 : Histoire simplifiée d'un système	17
3 : Plan synoptique du document	18
4 : Thèmes pour appréhender les systèmes (à faire et pour faire)	21
5 : Première approche des concepts de l'ingénierie système	22
6 : Première approche du projet (vu comme un système)	23
7 : Relations entre IS, système à faire et système pour faire	25
8 : Le système et son environnement	29
9 : Le système transforme des flux pour répondre à sa finalité	32
10 : Exemple de cycle de vie d'un système	33
11 : Le système étudié a besoin des services de "systèmes contributeurs"	35
12 : L'ingénierie système définit les produits contributeurs utilisés par les systèmes contributeurs; ces derniers font l'objet de projets	37
13 : Pilotage des transformations assurées par le système	38
14 : Aspects structurels internes du système : (a) Décomposition arborescente et (b) Composition, ou Architecture	41
15 : Niveaux d'invariance temporelle	43
16 : Vision générale d'un système : application des aspects temporels et de pilotage	44
17 : Sur le plan fonctionnel le projet est un processus d'ingénierie - Il doit être managé	51
18 : Environnement des projets et contraintes associées (vus dans le contexte d'une entreprise)	52
19 : Exemple de cycle de vie d'un projet	55
20 : Exemple de cycle de vie du projet de développement d'un système unique	56
21 : La tâche au centre de trois décompositions	60
22 : Complémentarité entre cycle de vie et processus	63
23 : Principe du pilotage d'un projet	65
24 : Un compromis entre besoins et contraintes de toutes les parties prenantes	70
25 : De l'émergence du besoin à l'ingénierie des exigences	71
26 : Sources des attentes et contraintes des parties prenantes	75
27 : Niveaux d'abstraction pour le cadrage du besoin et du problème	76
28 : La chaîne des exigences	86
29 : typologie des exigences des systèmes spatiaux (inspiration norme ECSS-E-10A)	89
30 : Exemple de typologie et origines des exigences système	90
31 : Principe de dérivation des exigences sur les constituants d'un système	91
32 : Modèle de données des exigences	92
33 : Principe de la conception d'un système	97
34 : Principe de l'IVVQ	99
35 : La vie opérationnelle du système	99
36 : Principe de décomposition et d'architecture	101
37 : Décomposition physique du système et arbre produit	103
38 : Principe de décomposition et allocation des exigences	104
39 : Principe d'allocation des exigences (inspiré de la norme EIA 632)	105
40 : Principe de décomposition et d'identification des interactions	106
41 : Structure d'interface	107
42 : Matrices de couplage	108
44 : Trois aspects d'une machine à laver le linge vue au niveau fonctionnel	112
45 : Architecture physique de la machine à laver le linge	113
46 : Recherche de solutions architecturales	114
47 : Arbre produit, base pour l'arborescence de spécifications (source : normes IEEE 1220, EIA632 et ISO15288)	115
48 : schéma simplifié d'un système socio-technique	118
49 : IVV et qualification	125
50 : Les dix éléments du soutien logistique (d'après l'ancien standard : MIL STD 1388-1A)	131
51 : Le soutien logistique intégré	131
52 : les processus, clé de la qualité	134

Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système

Version 3 - 12 02 2009

53 : Typologie des processus concernant l'IS	135
54 : Les méthodes abordées dans ce chapitre	135
55 : Processus de conception et modélisation systémique	136
56 : La mise en œuvre de l'IS en contexte industriel	137
57 : Schéma général d'un processus	140
58 : Le cycle de qualité d'un processus	141
59 : Domaines couverts par les 3 normes générales d'IS	144
60 : Cartographie des processus du cycle de vie du système (ISO 15288)	145
61 : Les processus de la norme EIA 632	145
62 : les activités de développement selon le cycle en V (pour mémoire)	147
63 : Les processus techniques du développement	148
64 : Le processus de définition des exigences	149
65 : Le processus de conception de la solution	149
66 : Le processus général de management de projet	152
67 : Exemple de processus contractuels (cas d'un système unique)	154
68 : Synthèse sur le rôle des processus d'entreprises	156
69 : Vision synthétique des processus d'ingénierie : la boucle d'ingénierie	157
70 : La boucle d'ingénierie système selon IEEE 1220	159
71 : Détail du processus de définition des exigences	160
72 : Détail du processus de conception de la solution	162
73 : Activités génériques de vérification et de validation	164
74 : Schéma générique d'un processus de V & V	165
75 : V & V d'un constituant lors de l'intégration	166
76 : Recherche d'optimisation de la solution (source NASA SE Handbook)	167
77 : Détail du processus générique d'évaluation-comparaison	168
78 : Rôles respectifs des processus, méthodes et outils	169
79 : Pourquoi modéliser en IS : quelques exemples	171
80 : Typologie de modèles	172
81 : Exemple de modèle sémantique du cœur de l'IS	173
82 : Vue synthétique du modèle de données AFIS	174
83 : Parmi les méthodes et outils de l'IS	175
84 : Diagrammes types en vision opérationnelle	182
85 : Représentation SADT de la machine à laver le linge (diagramme global et fonction laver)	184
86 : Diagrammes type en décomposition fonctionnelle	184
87 : Grille schématique de la représentation des systèmes (approche traditionnelle)	186
88 : Illustration de la grille sur la machine à laver le linge	187
89 : Taxonomie des diagrammes de SysML	188
90 : Grille d'analyse des systèmes complexes (inspirée de la méthode Sagace)	189
91 : Les 9 cases de la grille SAGACE	190
92 : Cadre de Zachman pour la description d'une architecture d'entreprise (vision simplifiée)	191
93 : Concepts de la maîtrise des risques	193
94 : Les activités de management des risques	195
95 : Interactions entre catégories de risques	196
96 : Caractérisation d'un risque	196
97 : Exemple de diagramme causes effets	197
98 : Criticité des risques	198
99 : Les mesures des "mérites" d'un système	201
100 : Les éléments du coût de cycle de vie	202
101 : Exemple d'arborescence des composantes de l'efficacité d'un produit technique	203
102 : Comparaison de solutions valorisées prenant en compte les risques	204
103 : Principaux concepts de la SdF	206
104 : Les exigences de sécurité	212
105 : La démarche de sûreté de fonctionnement	213
106 : Vue synthétique sur la maîtrise des risques système	214
107 : positionnement des SIL dans la matrice de criticité	215
108 : les composantes de la mise en œuvre intégrée de l'ingénierie système	218

Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système

Version 3 - 12 02 2009

109 : Ingénierie système et management de projet (selon INCOSE SE-Book)	220
110 : Concepts du management de projet	221
111 : Mise en oeuvre du management de projet	222
112 : Relations entre éléments de planification	224
113 : Echanges d'information entre management de projet et IS (boucle d'ingénierie)	225
114 : Activités de planification de l'IS	226
115 : Les activités de conduite de l'ingénierie système	227
116 : Jalon, revue, décision	229
117 : Exemple de processus de revue	230
118 : cycle de vie traditionnel d'un projet industriel	231
119 : Les processus d'obtention de la définition et de sa qualification	234
120 : l'obtention de la qualification de la définition	235
121 : les processus de production et transfert vers l'utilisation	236
122 : processus et documents concourant à la qualification industrielle et à la décision d'acceptation	237
123 : Les essais conduisant aux qualifications au cours du cycle de vie	238
124 : Niveaux de maîtrise d'un programme (dans le contexte du processus d'acquisition)	240
125 : Boucles politico-stratégiques et tactico-opératives	243
126 : Eléments de management du support de l'IS dans l'entreprise	245
127 : Exemple d'organisation matricielle	246
128 : Stratégie de déploiement et action de progression	248
129 : L'échelle générique de maturité d'un processus	250

AVANT PROPOS

Construire ou utiliser un objet technique complexe fait appel à la notion de **système**. Cette notion, ancienne dans les sciences physiques et humaines, est maintenant courante dans les pratiques industrielles et opérationnelles.

En la structurant en un corps de connaissances l'**Ingénierie Système** (souvent notée **IS** dans la suite du document) a produit "un mode de pensée et une façon d'appréhender les affaires par une approche structurée pour passer du besoin à la solution".

Le présent document s'appuie sur une description didactique des acquis pratiques et normatifs du domaine.

Il a pour objectif de donner au lecteur les bases structurantes pour :

- ☐ se repérer dans les normes et en comprendre les fondements,
- ☐ mener l'approfondissement des savoirs et savoir-faire concernant son activité en les replaçant dans une vision globale du métier,
- ☐ se préparer à conduire l'adaptation nécessaire aux cas, objectifs et circonstances rencontrés.

Cet objectif est complété par le souhait de contribuer à favoriser les coopérations et les échanges entre industriels ou universitaires, en créant les conditions préliminaires, fondées sur les équivalences nécessaires, aux dialogues entre métiers et secteurs.

Le lecteur est convié à établir son propre cheminement dans les 4 parties du document dont la structure, schématisée Figure 1, répond à la logique suivante :

- ☐ vers l'objet grâce au projet : **du système au projet**,
- ☐ en fonction d'un besoin : **le système répond à une finalité**,
- ☐ satisfait par une solution : **le système réalisé**,
- ☐ atteinte à travers une combinaison organisée de processus, méthodes et outils : **l'Ingénierie Système**.

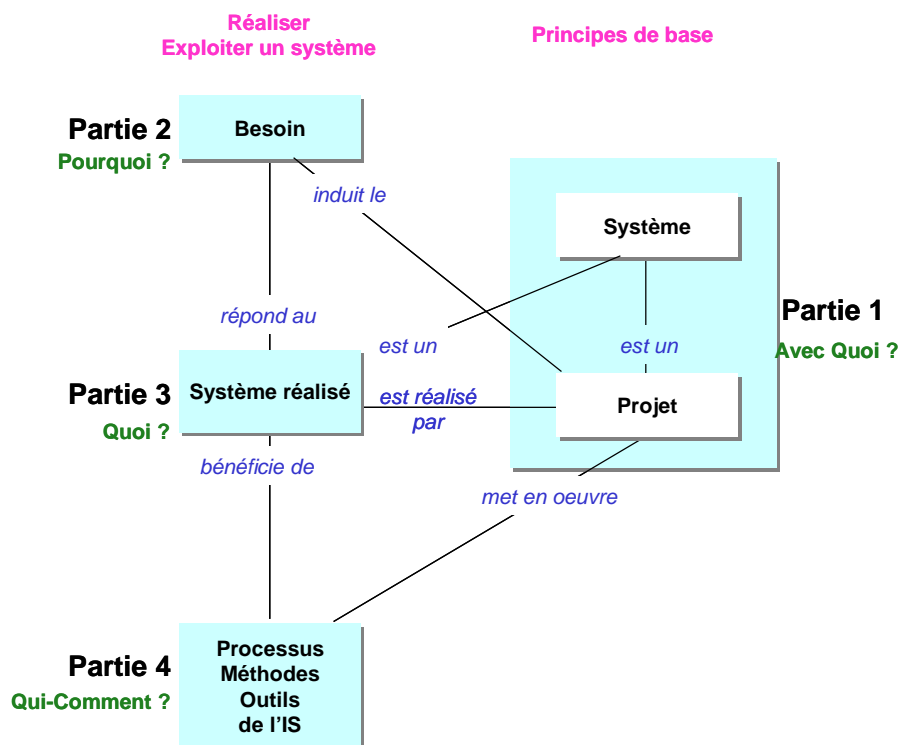


Figure 1 : Structure du document

Pour pénétrer dans l'univers de l'IS, il est nécessaire de comprendre ce qui caractérise un système et d'englober dans cette vision initiale le projet qui conduit à l'obtention et à l'utilisation du système. La **première partie** fournit ces bases et montre que le projet est lui-même un système auquel s'appliquent les principes de l'IS. Cette partie introduit les principaux concepts qui sont traités dans les parties suivantes.

A tous les stades de l'exécution du projet, il est indispensable de définir clairement à quels besoins répondent le système et ses constituants, et pour cela d'en identifier les parties prenantes. Pour le système, vu dans sa globalité, cela passe d'abord par l'explicitation de sa finalité, puis, au cours de sa conception et de sa réalisation par la spécification et la gestion des exigences qui lui sont applicables. La **deuxième partie** fournit les bases de cet aspect important de l'IS.

Les concepteurs et réalisateurs ont terminé leur travail. Fermez les yeux, vous verrez le système là devant vous. Comment en sommes-nous arrivés là et comment le système va-t-il vivre à partir de là ? La **troisième partie** a pour objectif de présenter les principes et bonnes pratiques associés aux stades correspondants du cycle de vie du système.

Les trois premières parties ont présenté les principes généraux et le cadre général de l'application de l'IS. Celle-ci fait l'objet de la **quatrième partie** qui en présente les processus et méthodes ainsi que la mise en œuvre dans le projet et dans l'entreprise.

En lisant ce document, le lecteur découvrira que l'IS n'est pas une révolution mais une démarche systématique, qui intègre de manière structurante les retours d'expérience, tant pour les méthodes que pour les bonnes pratiques.

L'ambition des rédacteurs est que, après avoir lu cet ouvrage, le lecteur adopte "une approche système" dans la conduite de ses activités professionnelles.

Adopter une approche système c'est garder à l'esprit que le système répond à une finalité, qu'il est plongé dans un environnement, qu'il représente une solution aux attentes et exigences de ses parties prenantes et que cette solution résulte souvent de compromis entre des exigences pas toujours convergentes.

Ainsi, « Découvrir et comprendre l'ingénierie système » n'est ni une nouvelle norme, ni une nouvelle méthode, ni même un manuel de plus.

Ce texte a pour ambition de faire découvrir et comprendre ce qui fonde les savoirs, les savoir-faire et, peut être, les « savoir-être » de l'ingénieur système.

Il ne se définit pas par rapport à une norme, il ne cherche pas à imposer telle ou telle méthode : Il n'a pas les objectifs d'exhaustivité, et de formalisme d'un référentiel normatif :

- *S'appuyant sur les différentes normes, il s'attache à en rechercher et expliciter les fondements, et, derrière la lettre, atteindre l'essence de l'ingénierie système et de ses activités.*
- *Plus portée sur la méthodologie que sur telle ou telle méthode, il cherche à ouvrir l'esprit à choisir, à adapter aux besoins et à utiliser les méthodes avec pertinence.*
- *Ouvert sur les problématiques de mise en œuvre de l'ingénierie système dans les programmes et dans les entreprises, il ouvre à confrontation des points de vue des différents acteurs ainsi qu'au travail collaboratif et son management.*

On l'aura compris, c'est fondamentalement l'aspect pédagogique qui a été choisi pour structurer cette présentation de l'ingénierie système intégrant les points de vue et les acquis de l'AFIS. Les risques de simplification inhérents à ce parti pris pédagogique y sont toutefois compensés par les réflexions et annotations provenant des nombreux relecteurs immergés dans le métier. C'est donc, à ce jour, le document de référence AFIS en matière de formation et d'auto-formation à l'ingénierie système.

Guide de lecture de l'ensemble du document

Afin de fixer dès maintenant les idées, la Figure 2 présente de manière simplifiée l'histoire d'un système. Elle nous servira de fil rouge tout au long de ce document, notamment pour les trois premières parties.

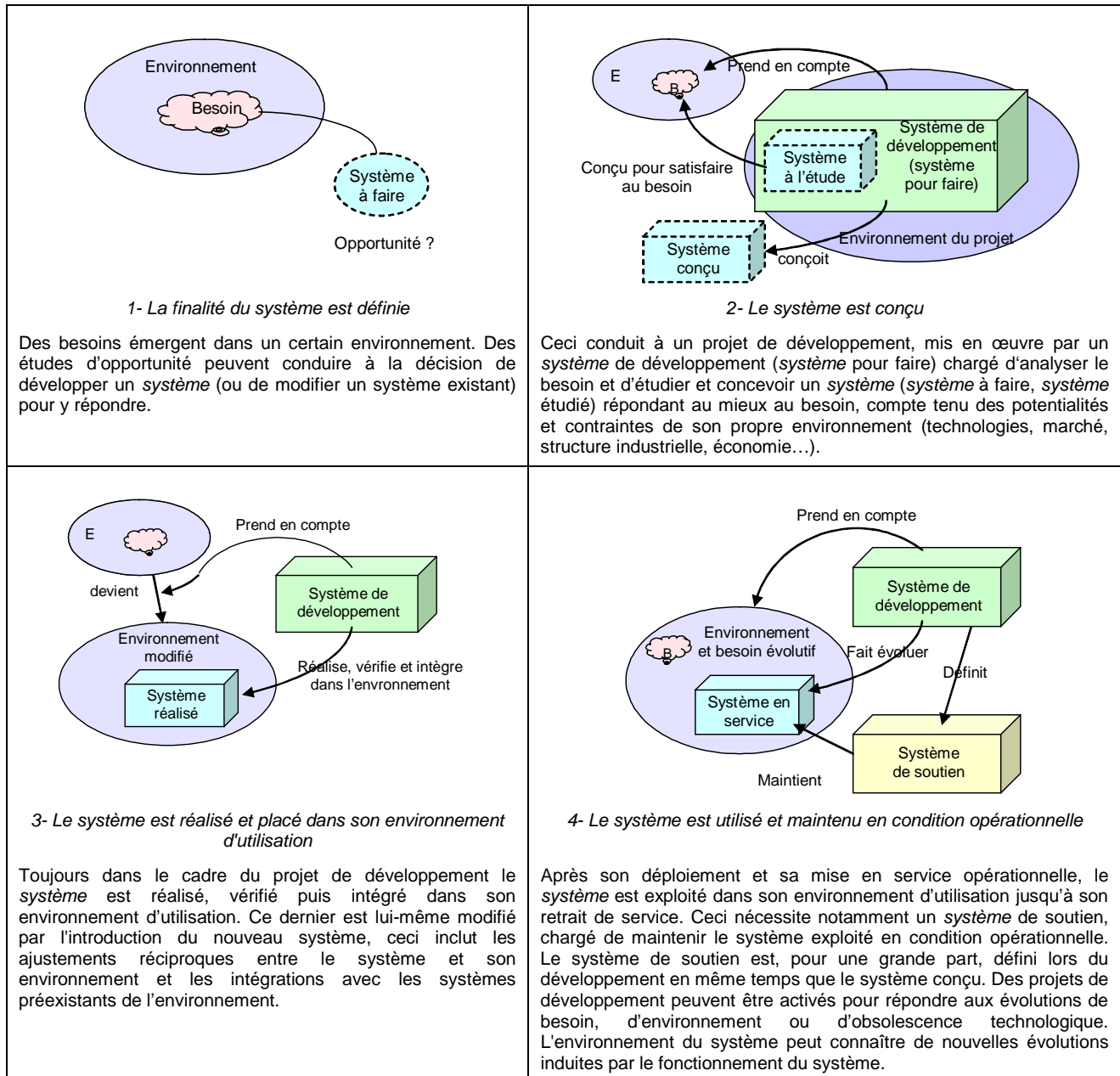


Figure 2 : Histoire simplifiée d'un système

Le système à faire (ou système étudié par l'ingénierie système pour répondre au besoin) qui nous intéresse au premier chef passe par divers stades (à l'étude, conçu, réalisé, déployé, exploité et maintenu, retiré du service). Ceci demande la contribution de plusieurs autres systèmes, dits *systèmes contributeurs*. Ce sont, par exemple le système de développement pour concevoir et développer le système à faire et le système de soutien pour l'exploiter et le maintenir en condition opérationnelle une fois mis en service, qui sont représentés Figure 2, mais aussi des systèmes de production, de déploiement, de démantèlement... Ces différents systèmes doivent

être conçus, réalisés et mis en service en fonction des besoins du système étudié. Leur conception relève également des démarches d'ingénierie système.

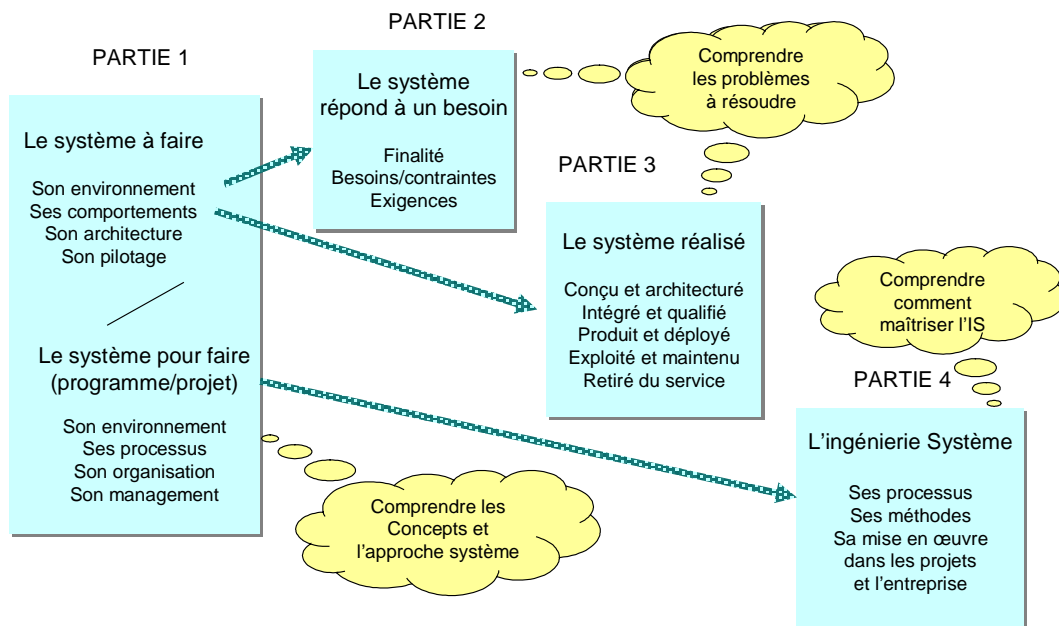


Figure 3 : Plan synoptique du document

Le document se compose de quatre parties :

La première partie introductive à l'ingénierie système est consacrée aux concepts généraux relevant d'une approche système, utilisés pour appréhender successivement :

- ☐ le système étudié pour répondre au besoin,
- ☐ son système de développement en montrant comment ces mêmes principes s'appliquent à l'ingénierie des projets.

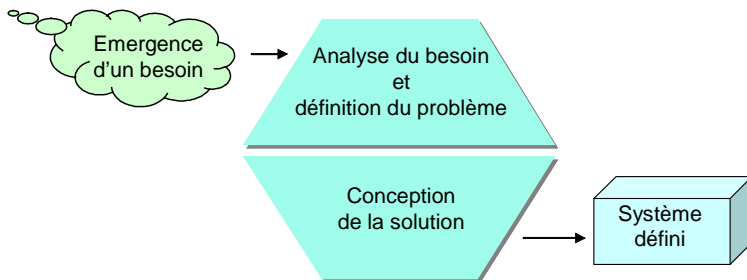
Les parties 2 et 3 du document traitent du système étudié, dans le but de mettre en évidence les aspects tant conceptuels que pragmatiques fondateurs des approches méthodologiques de l'ingénierie système.

- ☐ Dans la partie 2, le système à réaliser est vu comme devant répondre à une finalité. Comment définir le besoin à satisfaire (émergeant dans l'environnement du futur système), puis passer de ce besoin au problème à résoudre (qui tient compte également des opportunités et contraintes du contexte environnemental du système de développement) ? Comment formaliser la position de ce problème sous forme de spécifications successives prescrivant les exigences auxquelles devra satisfaire la solution (le système, ses constituants, ses systèmes contributeurs) ?
- ☐ Dans la partie 3 le système réalisé est analysé sous trois aspects :
 - Il résulte d'une démarche de conception : Comment concevoir la solution pour satisfaire aux exigences ? Comment définir sa composition et son fonctionnement ? Comment le traduire en architecture ?
 - Il est physiquement réalisé et intégré dans son environnement d'utilisation : Comment réaliser le système à partir de ses constituants, vérifier sa conformité aux exigences, l'intégrer dans son environnement opérationnel et, *in fine*, le qualifier ?
 - Il a une vie opérationnelle : comment le système est-il produit en série, déployé, mis en service, exploité, maintenu en condition opérationnelle, retiré du service ?

La partie 4 peut alors aborder l'Ingénierie Système en connaissance de cause, autour de trois thèmes :

- ❑ Ses processus, qui apparaissent comme invariants quel que soit le type de secteur d'activité, de système, de projet..., ce qui permet de les formaliser au sein de normes décrivant les activités à faire.
- ❑ Ses méthodes et outils méthodologiques, pour réaliser ces activités.
- ❑ Sa mise en œuvre et son management dans les projets et programmes (dont le projet de développement) ainsi que son déploiement dans l'entreprise.

Chacune de ces quatre parties propose en préalable un guide de lecture qui peut être utilisé tant en introduction à la lecture, qu'en synthèse après lecture.



Nous y utilisons de manière systématique le schéma ci contre pour présenter les concepts de l'ingénierie système et leur utilisation par le système de développement pour passer de l'émergence d'un besoin à la position du problème à résoudre, puis à la solution à ce problème conçue pour répondre au besoin initial.

Les parties sont relativement indépendantes : le lecteur peut donc, à l'aide des guides de lecture et de ses acquis préalables, les aborder dans l'ordre qui convient à ses besoins. Des références croisées lui permettent de trouver au cours de la lecture les éléments d'autres parties qui lui seraient utiles, soit en introduction des concepts, soit en approfondissement.

PARTIE 1 : DU SYSTEME AU PROJET

Guide de lecture de la partie 1

Cette première partie a pour objectif d'introduire la notion de système et, au travers de cette notion, de faire découvrir les premiers fondements de l'ingénierie système.

- ❑ La notion de système est d'abord présentée sous l'angle du « système à faire », ce qui, outre la présentation des concepts de base sur les systèmes, donne une première approche du besoin d'ingénierie système ainsi que de ses concepts fondamentaux,
- ❑ Elle est ensuite appliquée au « système pour faire », c'est-à-dire au projet de développement du système à faire : la planification (incluant l'organisation) du projet y est alors assimilée à l'ingénierie système du système de développement.

Les systèmes considérés en ingénierie système sont complexes : ils ne peuvent s'analyser qu'à travers différents points de vue. Voici les quatre thèmes majeurs qui sous-tendent la présentation (voir Figure 4) :

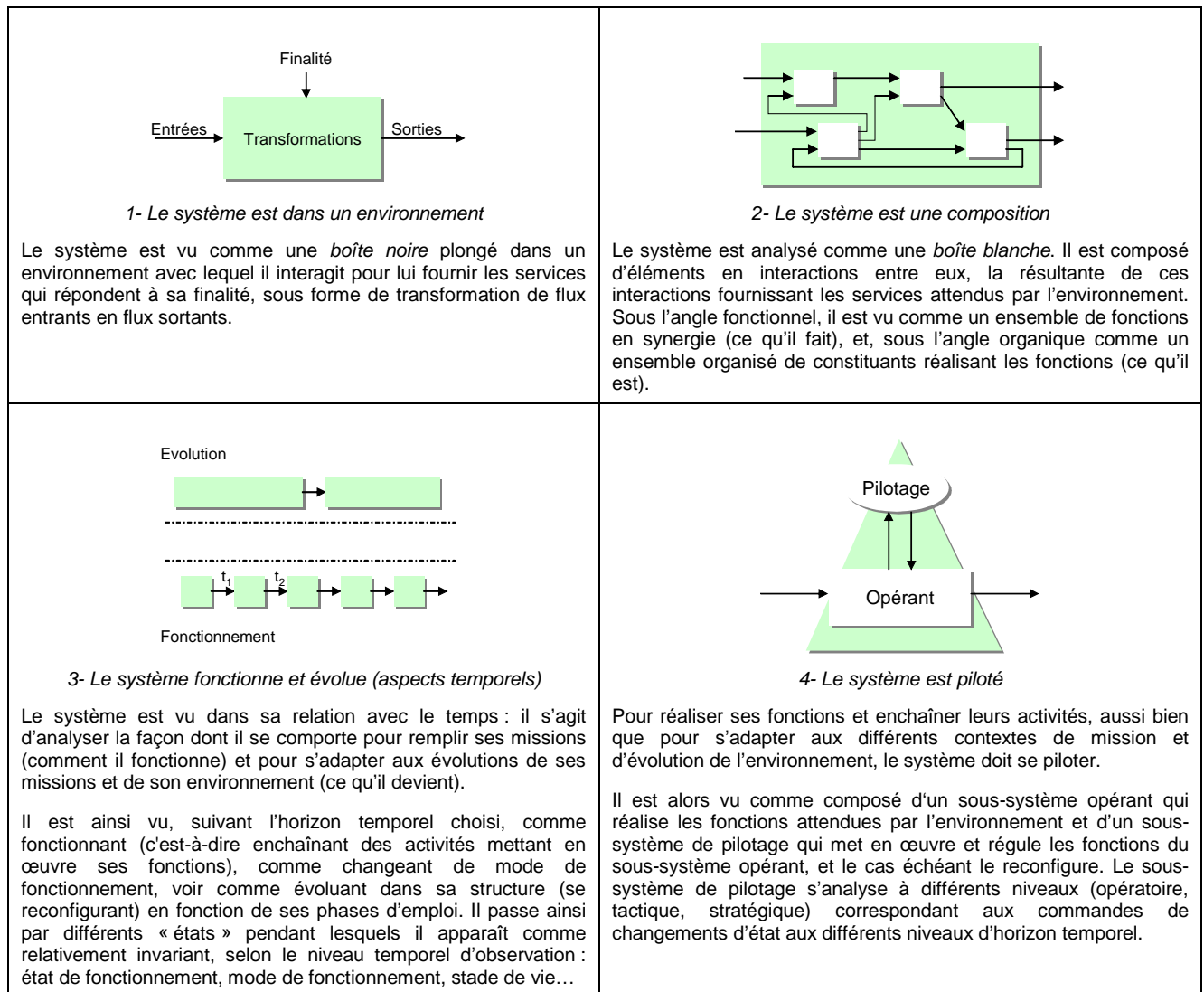


Figure 4 : Thèmes pour appréhender les systèmes (à faire et pour faire)

Cette analyse du système à faire (vu successivement comme une boîte noire en interaction avec son environnement, puis comme une boîte blanche constituée d'éléments en interaction) nous conduit à une première approche des concepts de l'ingénierie d'un système (voir Figure 5). Utilisant la représentation introduite dans le "Guide de lecture d'ensemble", cette figure illustre la séparation entre le domaine du problème à résoudre (ce qui est attendu de la solution pour répondre au besoin, le pourquoi ?) et le domaine de la solution (ce qu'est la solution, le quoi ?).

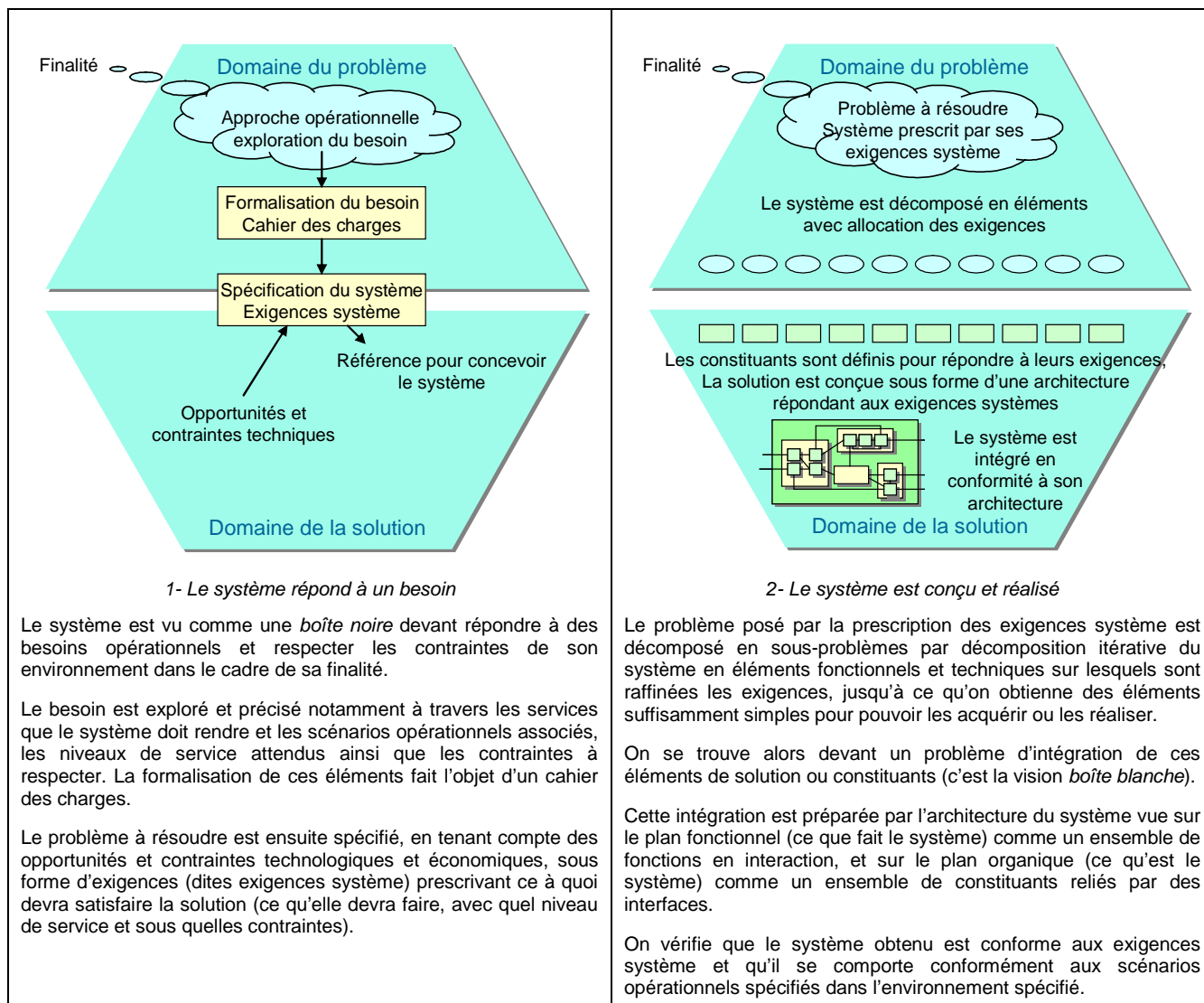


Figure 5 : Première approche des concepts de l'ingénierie système

Le même type d'analyse appliquée au projet de développement du système nous amène à assimiler le projet de développement à un système, et donc la planification du projet (identification des tâches et estimation des ressources nécessaires, structuration et organisation du projet, affectation des tâches, estimation des coûts et élaboration du planning...) qui élabore la définition du projet sous la forme des plans du projet, à l'ingénierie système du projet (voir Figure 6).

A l'instar de l'ingénierie du « système à faire », cette ingénierie du « système pour faire » commence par une approche boîte noire, permettant d'explorer et définir le problème à résoudre : obtenir un système répondant aux besoins dans le respect des objectifs économiques et temporel du projet et des contraintes de son environnement. L'approche boîte blanche permet ensuite de voir le projet sur le plan fonctionnel comme un

ensemble coordonné de processus et tâches en interaction et sur le plan organique comme un ensemble organisé de ressources et moyens en interaction pour réaliser ces tâches.

Au même titre que nous avons assimilé la planification du projet à l'ingénierie du « système-projet », nous assimilons la réalisation du projet à l'exploitation du système-projet en conformité aux plans ainsi définis. Ceci nécessite la coordination des tâches technique et le management des ressources en conformité avec le plan de management, ce qui permet d'introduire les rôles respectifs de l'ingénierie système et du management de projet.

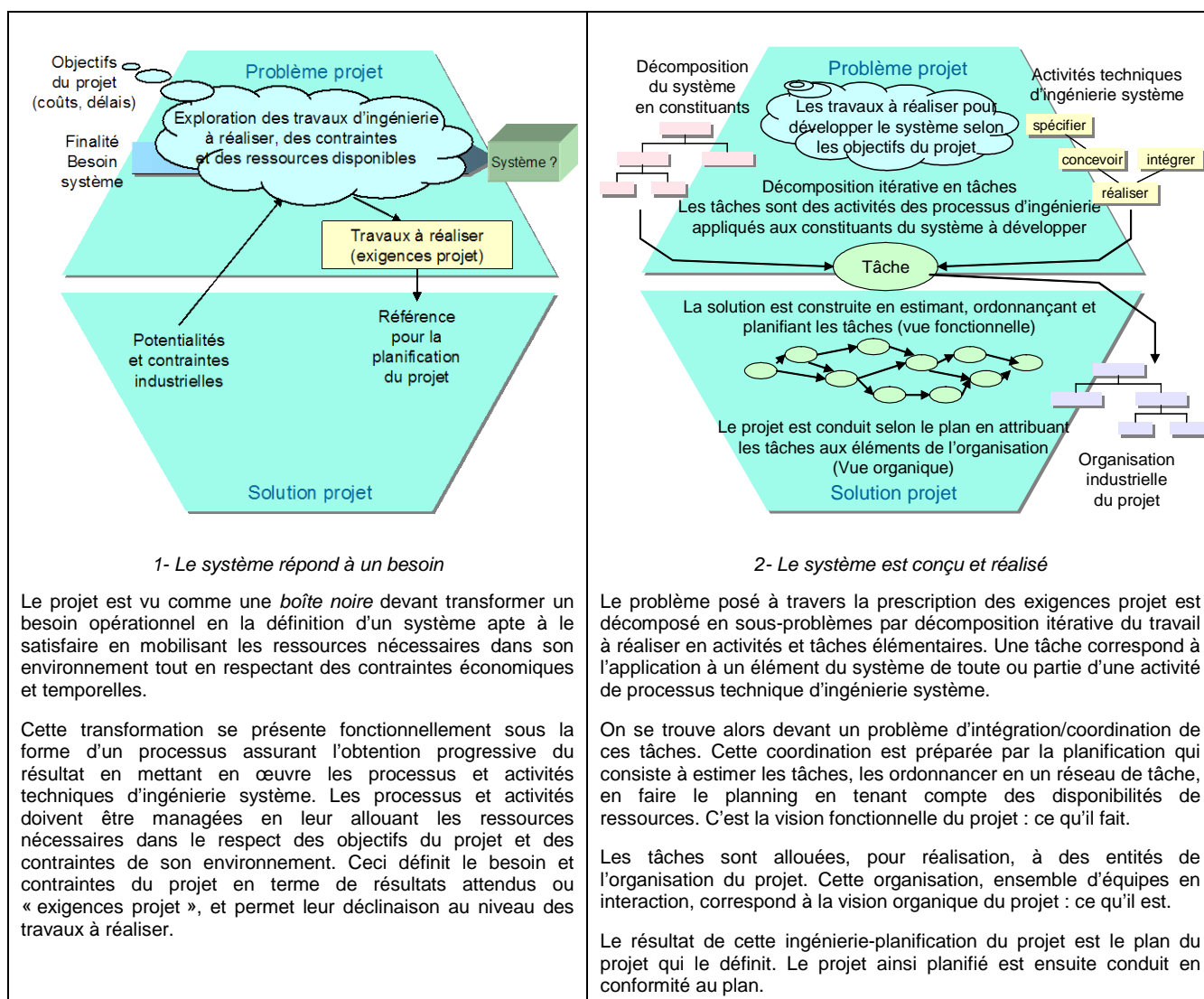


Figure 6 : Première approche du projet (vu comme un système)

1 PRESENTATION

1.1 Les deux types de systèmes considérés par l'IS

Par définition, tout système est constitué d'un ensemble d'éléments dont la synergie est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné.

L'**ingénierie système** regroupe l'ensemble des activités (hors activités de production) qui permettent de passer du besoin au choix de la solution cible retenue (le « **système à faire** » dit **système étudié** dans certains standards) puis à la cible réalisée (le **système réalisé** et mis à disposition pour exploitation).

Pour organiser, exécuter et coordonner toutes les activités qui conduisent à la conception, la réalisation et à la mise à disposition du système à faire, il est nécessaire de mettre en place un système doté de ressources humaines, techniques et d'information, ainsi que du financement correspondant (le « **système pour faire** »).

Ainsi, la définition générale énoncée ci-dessus s'applique aux deux sortes de systèmes impliqués en ingénierie système :

- ☐ Les systèmes développés dans un contexte mettant en œuvre l'ingénierie système. Dans l'état de l'art actuel de l'IS, ces systèmes sont plutôt à dominante technologique :
 - Ensemble organisé de matériels, logiciels, compétences humaines et processus pour répondre à un besoin dans un ou des environnements donnés.
- ☐ Les systèmes mis en œuvre pour réaliser l'ingénierie des précédents. Ces systèmes sont généralement à dominante organisationnelle :
 - Ensemble organisé d'équipes (réunions de compétences), de méthodes, de processus et de moyens pour répondre à un besoin (ici le besoin de développer un système), mobilisé dans un environnement technico-industriel donné.

Ces derniers systèmes participant à l'ingénierie des précédents, sont organisés en projets. Plusieurs projets peuvent concerner un même système : projets pour concevoir le système, projets pour produire et mettre en service ses exemplaires, projets pour déployer leur système de soutien, projets pour faire évoluer le système, projets pour retirer du service le système ou certains de ses constituants, etc.

Pour simplifier, dans cette introduction, le système pour faire y est assimilé au **projet de développement** initial du système conduisant au système réalisé prêt pour être exploité (et/ou produit en série).

Remarque : On donne souvent le nom de **programme** à l'ensemble coordonné des projets concourant au développement et à la vie d'un système complexe. Dans ce document nous utilisons le terme générique de **projet** pour ce qui concerne le développement de tout système ou sous-système ou produit ayant des caractéristiques de système. Le programme apparaît comme un « super-projet ». Dans la quatrième partie nous mettrons en évidence certaines particularités des programmes.

L'ingénierie système propose les approches et démarches méthodologiques générales pour développer des systèmes.

Les relations entre **ingénierie système**, **système étudié** et **projet de développement** sont illustrées très schématiquement sur la Figure 7.

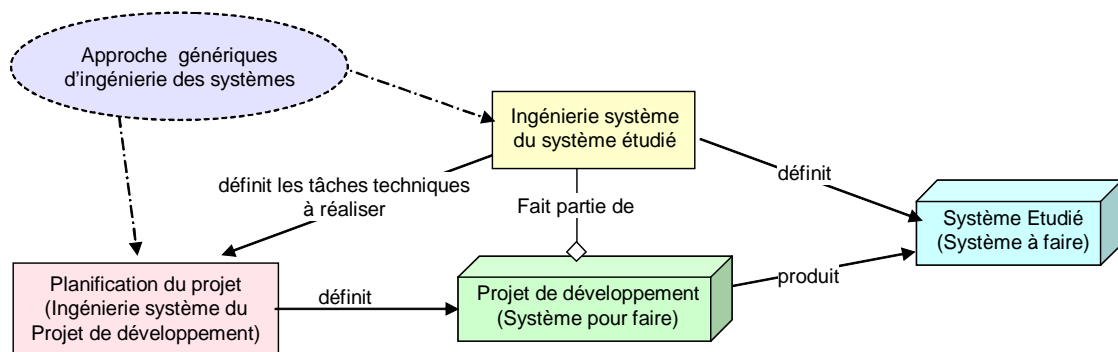


Figure 7 : Relations entre IS, système à faire et système pour faire

A noter que le terme « définir » est utilisé ici de façon générique au sens du résultat d'une opération de conception : la définition du système à faire comprend tous les documents nécessaires pour produire, exploiter et maintenir le système, la définition du projet comprend tous les plans nécessaires à l'organisation et la conduite du projet. Notons également que la définition du système étudié n'est complètement acquise qu'après les essais satisfaisants en environnement opérationnel du système, s'il est unique, ou des premiers de série, s'il s'agit d'un produit réalisé en plusieurs exemplaires. Tout ceci sera précisé par la suite.

Rappelons que cette partie 1 du document a pour objectif de définir successivement les concepts généraux applicables à ces deux sortes de systèmes concernés par une démarche d'IS :

- ☐ le **système étudié**,
- ☐ le **projet de développement**, dit aussi **le Projet** dans la suite.

Le système étudié et le projet de développement ne sont pas les seuls systèmes concernant l'IS :

- ☐ Le projet contribue à développer le système étudié : à ce stade le système étudié ou système cible est dit "virtuel". Pour ce faire le projet peut faire appel à la contribution d'autres systèmes (plateformes de développement ou d'intégration, système de production des prototypes de développement, laboratoires d'essais spécialisés par exemple), souvent pré-existants au projet.
- ☐ Une fois réalisé, le système étudié entre dans sa vie opérationnelle : le système est dit "vivant". Il a alors également besoin de la contribution de systèmes associés appelés systèmes contributeurs (pour la production, le déploiement, l'approvisionnement, la maintenance, le retrait de service du système s'il est unique ou de ses exemplaires dans le cas contraire).

Parmi eux, citons tout particulièrement le **système de soutien** qui regroupe les éléments contribuant au maintien du système, dit alors système principal, en condition opérationnelle. D'une certaine manière, le système de soutien est au système vivant ce que le système-projet est au système virtuel.

Notons que l'on est passé d'une vision traditionnelle {système principal, système de soutien}, à une vision plus actuelle {système étudié, systèmes contributeurs}.

- ☐ Dans la vision traditionnelle, on associe au système étudié, alors dit système principal, son système de développement lorsqu'il est au stade d'étude, puis son système de soutien lorsqu'il est au stade réalisé. L'ingénierie système doit définir aussi bien le système de soutien que le système principal.
- ☐ Dans la vision actuelle (celle des normes d'IS) on associe au système étudié un ensemble de systèmes contributeurs, ces systèmes contributeurs faisant eux-mêmes l'objet de leur propre ingénierie système. Ces systèmes contributeurs doivent être opérationnels au stade de vie où le système étudié en a besoin. Cette vision provient de ce que les systèmes contributeurs peuvent être communs à plusieurs systèmes (on ne conçoit pas un nouveau lanceur pour chaque nouveau système satellitaire). L'ingénierie système doit définir tout ce qui, dans l'ensemble des systèmes contributeurs, est spécifique au système étudié, ceci allant d'un système contributeur complet s'il ne répond qu'au besoin du système étudié, à l'adaptation d'un système préexistant aux besoins propres du système étudié.

Ainsi, lors du développement, l'ingénierie système définit les produits du système étudié (ses constituants), mais aussi tous les produits contribuant à sa vie opérationnelle dits produits contributeurs dont les éléments du système de soutien, les adaptations de système contributeurs préexistants ou des compléments à ces derniers (voir Figure 12).

1.2 Les points de vue adoptés

Pour présenter ces concepts généraux en exploitant la même approche pour les deux sortes de systèmes considérées, système étudié et projet, deux points de vue complémentaires sont adoptés :

- ☐ Dans un premier temps, le système est considéré comme inclus dans un (ou des) environnement(s) avec le(s)quel(s) il interagit.

Le système est vu comme une « boîte noire » (vue externe) devant fournir aux éléments de l'environnement les services attendus et devant respecter les contraintes qu'ils imposent, ces services et contraintes constituant le besoin que le système doit satisfaire.

- ☐ Dans un second temps, le système est considéré comme constitué d'éléments en interaction.

Le système est maintenant vu comme une « boîte blanche » (vue interne) dont la représentation précise la solution retenue pour répondre au besoin.

Ces deux points de vue sont à la base des principes de la conception d'un système, présentés respectivement dans les parties 2 et 3.

En regard de ces deux points de vue, boîte noire et boîte blanche, le « système à faire » ainsi que le « système pour faire » sont présentés sous les aspects :

- ☐ Boîte noire : le système dans son environnement
 - Contextuel : inclusion dans un contexte : finalité, environnement, interactions (transformations), interfaces externes
 - Temporel : évolution face à l'environnement : cycle de vie
 - Pilotage : pilotage externe et autonomie
- ☐ Boîte blanche : l'architecture (organisation) et son fonctionnement
 - Structurel : organisation interne composition, architecture/organisation, interfaces internes
 - Temporel : comportement interne et évolution fonctionnelle et structurelle,
 - Pilotage : niveaux et organisation du pilotage.

Nous en déduisons les conséquences pour l'ingénierie système, définie alors comme une démarche méthodologique pour concevoir, faire développer, intégrer, vérifier et faire évoluer le système.

Boîte noire et boîte blanche

Cette séparation entre boîte noire et boîte blanche, traditionnelle dans toute approche pédagogique des systèmes et de la complexité, est également très structurante pour l'ingénierie des systèmes.

- ☐ La vision boîte noire est logiquement celle du maître d'ouvrage, représentant des utilisateurs du système : c'est à lui qu'incombe la responsabilité de définir le besoin : ce que doit faire le système face à son environnement, quelles contraintes environnementales il devra respecter et comment il sera intégré dans son environnement.
- ☐ La vision boîte blanche est logiquement celle du maître d'œuvre, représentant des réalisateurs du système : c'est à lui qu'incombe la responsabilité de concevoir la solution répondant à ce besoin ainsi défini : l'architecture interne du système et donc la manière dont il sera intégré à partir de ses constituants, pour être conforme à la vision boîte noire.

Nous mettrons en évidence, au long de ce document, que toute confusion entre ces deux rôles est préjudiciable tant pour le système à faire (risque de besoin défini par la solution et non l'inverse par exemple) que pour le projet pour le faire (risque de modification incessante de la définition du besoin entraînant de multiples reprises de conception de la solution), mais aussi que l'optimisation de l'ensemble système à faire et projet pour le faire nécessite une forte intégration de ces deux visions. C'est un des problèmes fondamentaux de l'IS.

2 LE SYSTEME A FAIRE : LE SYSTEME ETUDIE

2.1 Préalable : le système

Nous nous intéressons ici aux concepts généraux des systèmes appliqués au « système à faire » tel qu'il est réalisé après que sa conception et sa réalisation l'aient concrétisé.

Ce « système » ainsi concrétisé représente la **solution** choisie et apportée par l'ingénierie du système qui tend à apporter la meilleure réponse à la question : quel système réaliser pour satisfaire, au mieux aux besoins et contraintes traduisant sa finalité ?

Un système est une abstraction

Le « système à faire » est initialement un concept, une abstraction, le résultat concret de sa réalisation est un « produit » (produit-système) ayant les caractéristiques d'un système et répondant à une définition qui en précise toutes les caractéristiques techniques, de production, d'exploitation de maintenance...

Ce « produit-système » peut être réalisé en un ou plusieurs exemplaires. Ces exemplaires peuvent éventuellement différer, selon des variantes prévues par la définition du système, pour répondre à des besoins, contraintes ou environnements différents.

Même après conception et réalisation, le terme de « système » garde ainsi une connotation abstraite : il fait référence à sa définition, même s'il est souvent utilisé pour désigner le système concret s'il est unique ou un de ses exemplaires dans le cas d'une réalisation en plusieurs exemplaires.

Pour appréhender cette abstraction complexe, nous utilisons des **modèles** qui sont des représentations construites dans un objectif défini, donnant du système une vue partielle, à un niveau de granularité ou de détail donné permettant d'en étudier certaines de ses caractéristiques.

La conception d'un système passe par des modèles successifs de plus en plus détaillés du système à faire, le dernier étant sa **définition**.

Cette définition constitue la référence finalisée et complète pour produire le système à réaliser.

Le système ainsi défini doit être fabricable, assemblable et vérifiable de façon fiable et répétitive par son système de production qui doit également être défini. Le ou les produits résultants doivent être exploitables et maintenables.

2.2 Le système : Vue externe

En adoptant l'approche « boîte noire », nous nous intéressons ici aux relations entre le système et son environnement - ce que le système fait et les interrelations et impacts réciproques avec son environnement - non à la manière dont le système est fait.

Selon ce point de vue, tout système est, de manière très générale, approché comme :

- ☐ étant un tout placé dans un environnement (on différencie le système de ce qui est dans son environnement),
- ☐ répondant à une finalité (ou à des propriétés téléonomiques pour les systèmes naturels),
- ☐ interagissant avec l'environnement pour assurer sa finalité,
- ☐ évoluant pour continuer à assurer sa finalité compte tenu des évolutions de son environnement.

Appliquons ces caractéristiques générales de la vision boîte noire à notre « système à faire », en approchant le système du point de vue contextuel (relations entre système et environnement) ainsi que du point de vue temporel (le devenir du système), ce dernier pouvant faire intervenir une part de pilotage externe (incluant des éléments externe dans la boucle de pilotage).

2.2.1 Aspects contextuels

2.2.1.1 Le système a une finalité

Le système a pour raison d'être de répondre à des objectifs ou attentes, de natures variées (opérationnelles, technique, économique, politique...), qui caractérisent le besoin.

Du point de vue technique de l'ingénierie système, le système a une finalité précisée à travers les produits ou services que l'on en attend.

La finalité d'un véhicule automobile est d'assurer le transport individuel par voie terrestre des personnes (et de leurs biens).

2.2.1.2 Le système est « plongé » dans un environnement

Un système n'est pas isolé dans l'espace, il est en relations avec son **environnement** avec lequel il interagit.

En IS, un système peut être conçu pour être utilisé dans différents environnements, ou être adaptable à des changements d'environnement.

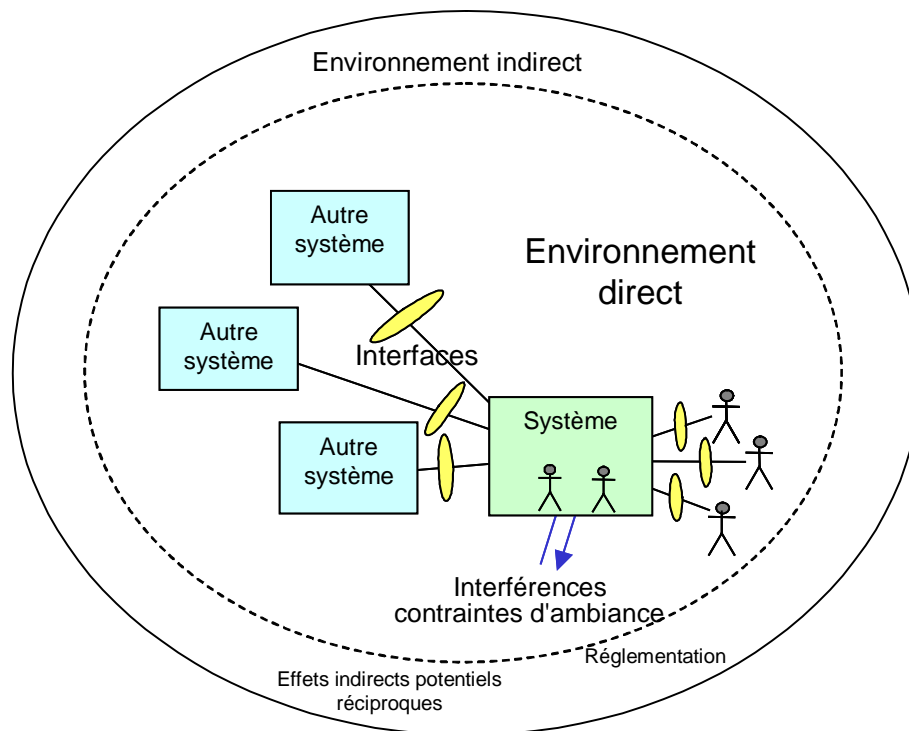


Figure 8 : Le système et son environnement

L'environnement est défini comme tout ce qui est susceptible d'influencer ou d'être influencé par le système.

L'environnement est généralement vu comme ce avec quoi le système interagit directement. Nous l'appellerons environnement direct. Le système peut aussi avoir des impacts indirects sur son environnement, par exemple

les effets à long terme de ses déchets, ou vice-versa. Ceci conduit à étendre, en ingénierie des systèmes, l'analyse de l'environnement à ce que nous appelons ici l'environnement indirect.

2.2.1.2.1 L'environnement direct du système : interactions et interfaces

C'est par le biais d'interactions avec l'environnement que le système répond à sa finalité (aux besoins), mais qu'il a également des impacts réciproques positifs ou négatifs sur cet environnement.

Les **interactions** entre le système et son environnement se font via des **interfaces** entre éléments du système et éléments de l'environnement. Ces interfaces peuvent être clairement identifiées, comme c'est le cas des interfaces avec les humains ou les autres systèmes de l'environnement. Elles peuvent être plus diffuses comme par exemple pour des échanges thermiques, des effets de corrosion, des interférences électromagnétiques, des radiations...

L'ensemble du système et des éléments techniques ou humains avec lesquels il interagit peut dans certains cas être appréhendé comme un système. On le considère alors comme le **système englobant** le système étudié (parfois appelé son sur-système).

Un cas particulier de système englobant est celui des systèmes de systèmes. Chaque système constituant répond de manière autonome à sa propre finalité, le fonctionnement collaboratif des systèmes constitutants faisant émerger de nouvelles propriétés participant à la finalité du système global.

2.2.1.2.2 L'environnement indirect du système : études d'impacts et risques

On est conduit à étendre, au-delà de ce qui interagit directement avec le système, l'analyse de l'environnement :

- ☐ à ce qui est susceptible d'être indirectement impacté par l'existence du système (conséquences sociales, économiques, écologiques de son existence, de ses dysfonctionnements, de ses rejets...),
- ☐ à ce qui, dans l'environnement, risque de faire peser des menaces ou des limitations d'emploi ou de capacités, tant sur le système que sur les services qu'il rend,
- ☐ à ce qui, de ce fait, impose des contraintes au système (législation, réglementation, organismes de défense de l'environnement, organisations représentatives des travailleurs, des utilisateurs directs et indirects...).

Ceci nécessite notamment des études d'impacts et la prise en compte des risques réciproques système environnement.

L'homme et le système

La plupart des systèmes concernés par l'IS sont, pendant leur utilisation opérationnelle, en relation avec des acteurs humains qui peuvent agir sur le comportement du système.

Vis à vis du comportement du système en fonctionnement, les principaux acteurs humains peuvent être qualifiés comme :

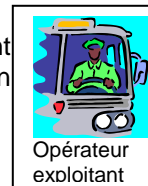
- ☐ Utilisateurs passifs : ils n'agissent pas directement sur le pilotage du système (exemple : passagers d'un avion qui n'agissent sur l'avion que par leurs masses, leurs déplacements, les perturbations électromagnétiques qu'ils peuvent générer, ...)
- ☐ Utilisateurs actifs, ils bénéficient de manière "interactive" des services fournis par le système (exemple utilisateurs d'un système informatique qui soumettent des données au système et reçoivent des données traitées en retour)
- ☐ Les opérateurs exploitants : ils agissent directement sur le pilotage du système et sont nécessaires à son fonctionnement (exemple : conducteur d'un véhicule de transport en commun vis à vis du comportement de son véhicule).



Utilisateur passif



Utilisateur actif



Opérateur exploitant

D'autres types d'acteurs peuvent être identifiés, en particulier les opérateurs liés au maintien en condition opérationnelle (pour des activités du soutien logistique telles que ravitaillement, maintenance ...), selon les cas ils interviennent, ou non, sur le système au cours de son fonctionnement opérationnel. Leur contribution est nécessaire pour assurer la permanence du fonctionnement opérationnel du système



Opérateur maintenance

Pour les systèmes dits "technologiques", la composante technique du système est généralement la plus importante. A l'opposé, pour d'autres systèmes dits « socio-techniques » c'est la composante humaine et organisationnelle qui paraît la plus importante, car le comportement du système est fortement dépendant du comportement des acteurs humains.

L'homme est-il dans le système ?

Dans le principe, l'humain, sous forme individuelle ou collective organisée, fait partie du système dès lors qu'il participe à sa finalité. Ainsi, l'opérateur-exploitant fait partie du système (sans lui, le système ne pourrait accomplir sa finalité, ce ne serait donc pas un système), tandis que l'utilisateur, au sens utilisateur passif ou simple usager, n'est normalement pas considéré comme faisant partie du système.

Reste que, pour les praticiens de l'IS, le point de vue peut varier

- *Selon le niveau de système auquel on s'intéresse : dans un système d'information et de commandement les opérateurs fournissant et traitant de l'information font partie du système. Dans le système informatique supportant le système d'information, ces opérateurs deviennent des utilisateurs, seuls les opérateurs contrôlant le fonctionnement technique du système informatique sont alors dans le système.*
- *Selon le point de vue ou le centre d'intérêt : le fait que la répartition des fonctions entre la composante humaine et la composante technologique soit généralement faite très tôt dans la conceptualisation du système conduit, pour les réalisateurs par exemple, à considérer la composante technologique comme « le » système.*

2.2.1.2.3 Le système interagit avec son environnement

Tout système interagit avec son environnement par des **échanges de flux** (de matière, d'énergie ou d'information).

Le système réalisé transforme des flux entrants en flux sortants, ces transformations concrétisant notamment la manière avec laquelle il offre les services à son environnement pour répondre à sa finalité.

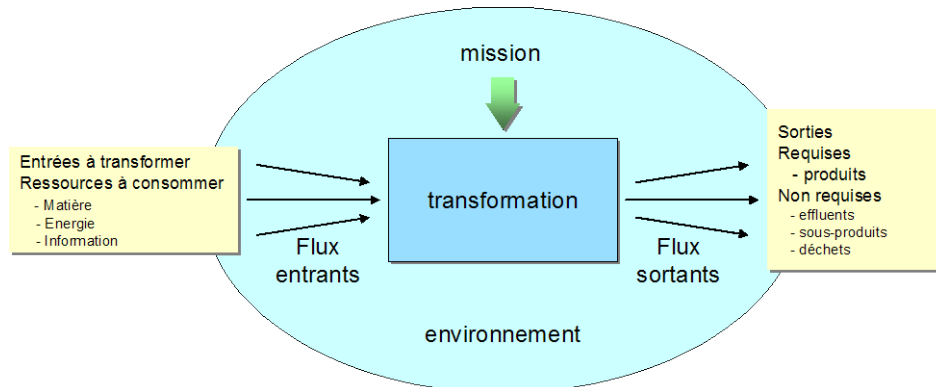


Figure 9 : Le système transforme des flux pour répondre à sa finalité

Il faut noter que :

- Les flux entrants peuvent être transformés, consommés ou utilisés par le système.
- Les flux sortants peuvent être :
 - ✓ les produits (résultats) attendus,
 - ✓ des produits non requis, mais générés par la transformation (déchets par exemple).

Lorsqu'il se déplace, un véhicule automobile à moteur thermique transforme (consomme) du carburant en énergie utile (mécanique et électrique) et utilise de l'information de commande. Il produit aussi de l'énergie perdue en chaleur et des gaz d'échappement.

2.2.2 Aspects temporels externes

Vu sous l'angle temporel, tout système présente des comportements visant à assurer sa finalité et des évolutions visant à continuer à l'assurer en cas de modification de son environnement, de la finalité, de son vieillissement, etc.

Le système réalisé est ainsi une entité dont la constitution et le comportement évoluent au cours du temps :

- ☐ La constitution du système évolue - s'adapte ou est adaptée - pour répondre à différentes évolutions (de la finalité, de l'environnement ou de la technologie, par exemple obsolescence) ou pour s'adapter à différentes situations.

Les évolutions peuvent porter sur le système en cours de réalisation comme sur le système réalisé en cours d'exploitation.

- ☐ Une fois réalisé et en exploitation, le système présente différents modes et états de fonctionnement.

2.2.2.1 Le système a un Cycle de Vie

La définition des comportements et des évolutions du système se place dans le cadre de son **cycle de vie**. Celui-ci va de l'émergence d'un besoin jusqu'au retrait de service.

Le **cycle de vie** (cf. Figure 10) est caractérisé par des phases de vie au cours desquelles le système se trouve dans différents stades :

- Avant sa mise en service, le système doit être conceptualisé, développé, vérifié, produit.
- A partir de sa mise en service, le système doit être déployé, exploité et maintenu en condition opérationnelle puis retiré du service (avec traitement de fin de vie : démantèlement, recyclage).

Certains ouvrages distinguent quelquefois le système virtuel (en conception), du système vivant (réalisé physiquement).

La Figure 10 illustre un cycle de vie classique.

- Dans le cas du système unique, l'intégration produit le système : il est, une fois qualifié, prêt pour le transfert vers l'exploitation.
- Dans le cas d'un système à exemplaires multiples, l'intégration (portant sur un ou des prototypes) conduit à la qualification de la définition du système. Celle-ci sert de référence pour la production des exemplaires.

Un cycle de vie de système peut présenter des itérations, à titre d'exemples :

- La qualification de la définition d'un système peut impliquer plusieurs cycles de conception de réalisation : maquettes de démonstration fonctionnelles, prototypes de faisabilité, exemplaires de présérie...
- Une évolution importante de la finalité ou de l'environnement d'un système en exploitation nécessitera de repasser par des stades de conceptualisation, conception, réalisation...

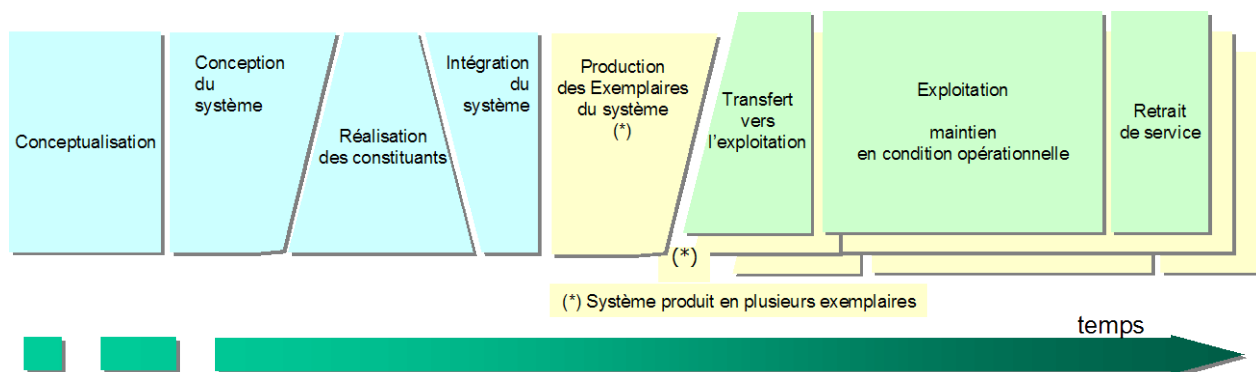


Figure 10 : Exemple de cycle de vie d'un système

2.2.2.2 Pendant l'exploitation, le système peut avoir divers états et comportements

Au cours de son exploitation le système rencontre différentes situations

Le système doit être conçu pour pouvoir adapter son état et son comportement de façon à répondre au mieux aux situations envisagées.

- ❑ L'état (l'agencement, voire la constitution) du système doit pouvoir **évoluer**, dans des conditions raisonnables - s'adapter ou être adapté - pour répondre à différentes évolutions de la finalité, de l'environnement ou de la technologie (obsolescence) ainsi qu'à différentes situations rencontrées.

Un véhicule automobile, type coupé-cabriolet, peut être transformé au gré de son conducteur, par mise en place ou retrait d'un toit rigide. Ses équipements doivent pouvoir être changés pour adapter le véhicule à des types de terrain ou de conditions climatiques donnés.

- ❑ Le système présente **différents comportements** (ou suites d'états de fonctionnement), pour rendre les services correspondant à ses missions, dans différents contextes d'emploi définis dans le cadre de sa finalité.

Un véhicule automobile peut être à l'arrêt (moteur arrêté ou en fonctionnement) ou en déplacement (à vitesse constante ou en accélération ou en décélération) ou en maintenance ...

2.2.2.2.1 Le système a un profil de vie

Durant l'exploitation, le système connaît différentes situations de vie.

Les situations rencontrées sont identifiées dans le cadre du **profil de vie** du système (partie du cycle de vie qui va de la mise à disposition de l'utilisation jusqu'au retrait de service du système).

A un instant donné le système peut être en utilisation (nominale ou dégradée) ou hors utilisation (par exemple en stockage, en transport, en maintenance...).

Le profil de vie d'un véhicule automobile comporte différentes situations : en stationnement, en utilisation, en transport sur remorque routière, en maintenance (maintenance préventive périodique ou dépannage)...

2.2.2.2.2 Le système répond à des missions

Les situations d'utilisation ou contextes d'emploi d'un système correspondent à sa finalité et peuvent être analysées à travers les **missions** types attendues du système.

Un véhicule automobile peut être conçu pour différentes missions : transport de personnes, transport de matériel ...

Les missions du système peuvent être caractérisées grâce à **des profils de mission** représentatifs, qui définissent les états et comportements (modes de fonctionnement) du système au cours des missions types. Cette définition s'affine souvent en imaginant puis analysant des scénarios, dits scénarios opérationnels, modélisant des emplois possibles du système au cours de la mission.

Pour un véhicule automobile tout terrain un profil de mission type - trajet mixte sur routes et en terrain libre, transport/livraison de matériel - est caractérisé par la succession des terrains franchis, des états de fonctionnement (accélération, freinage...), des reconfigurations (évolution du chargement du véhicule) tout au long du trajet ...

2.2.2.2.3 Le système a des périodes de fonctionnement

C'est dans ses périodes de fonctionnement que le système rend les services opérationnels correspondant à sa finalité d'utilisation ou encore les services logistiques répondant à ses besoins de maintien en condition opérationnelle (ravitaillement, maintenance, par exemple auto diagnostic de fonctionnement).

Dans ce document le système est dit "en fonctionnement" lorsqu'il est dans un état lui permettant de fournir (y compris de manière dégradée, voire en mode secours) le service attendu. Ainsi un véhicule automobile arrêté sur un parking sera dit "en fonctionnement" s'il n'est pas en panne ou mis volontairement hors fonctionnement.

Par opposition, le système est dit "hors fonctionnement" s'il n'est pas en mesure de fournir le service attendu. Un véhicule automobile transporté par un train autos peut être dit hors fonctionnement.

2.2.2.2.3.1 Le système présente des modes de fonctionnement

Les **modes de fonctionnement** sont fonction des étapes des profils de mission, de l'état de disponibilité (modes de fonctionnement dégradé) des constituants du système, des situations de vie (en essai, en déploiement, en maintenance, en formation des opérateurs).

Un avion peut être en mode pilotage manuel ou pilotage automatique, ou encore en mode de pilotage dégradé après avarie d'un réacteur.

2.2.2.2.3.2 Le système fonctionne pour rendre les services attendus

Dans un mode de fonctionnement donné, le système rend les services attendus dans ce mode en enchaînant et exécutant les fonctions correspondantes (ce qui correspond à un enchaînement d'états de fonctionnement).

Son **comportement** est généralement décrit dans cette vision externe par les scénarios d'échange (de matière, d'énergie, d'information) attendus entre le système et les systèmes ou acteurs de l'environnement.

Scénario de comportement au démarrage du véhicule, scénario de comportement de la conduite, scénario de comportement de la fonction navigation.

2.2.2.2.4 Les changements d'état et les comportements doivent être pilotés

Que ce soit en pilotage externe, via les scénarios de dialogue avec les acteurs et systèmes de l'environnement, ou en pilotage interne, les changements d'états (de phase de vie, de missions, de modes de fonctionnement, d'états de fonctionnement) doivent être déclenchés et contrôlés, les fonctions doivent être régulées.

2.2.2.2.5 Les comportements assurent les performances attendues

Les services rendus par le système, donc ses fonctions et comportements, sont assujettis à des niveaux d'exigences (temps de réaction, vitesse, débit, capacité, sûreté de fonctionnement...). On les caractérise en analysant les scénarios d'utilisation.

Le système répond à ces niveaux d'exigences à travers ses performances (capacités du système conçu/réalisé, niveau atteignable par rapport aux limites spécifiées ou aux marges de conception énoncées).

La non tenue des performances peut entraîner des risques majeurs pour le système et son environnement : c'est le domaine de la sûreté de fonctionnement (au niveau de l'ingénierie) et de la maîtrise des risques système en exploitation.

D'autres performances et aptitudes peuvent être attachées à des périodes hors fonctionnement (transportabilité, maintenabilité ...).

2.2.2.3 Le système a besoin de systèmes contributeurs

Au cours de son cycle de vie, le système étudié a besoin de la contribution d'autres systèmes (voir Figure 11).

Ces systèmes sont appelés **systèmes contributeurs**. Par opposition, le système étudié est généralement appelé **système principal**.

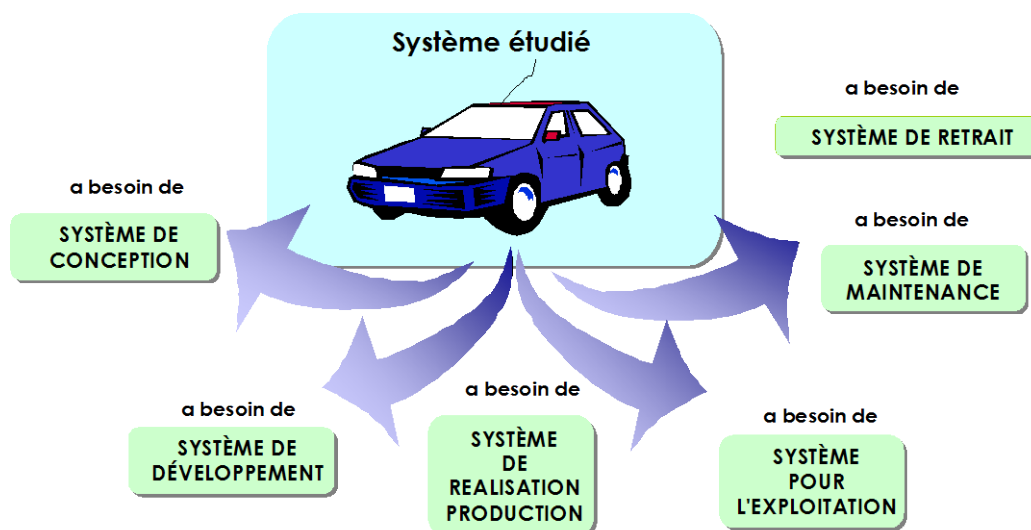


Figure 11 : Le système étudié a besoin des services de "systèmes contributeurs"

Les systèmes contributeurs doivent être opérationnels pendant les stades de vie du système où ils sont sollicités.

Par exemple :

- ✓ le système de production des sous-ensembles d'un véhicule automobile doit être opérationnel tant qu'on a besoin de produire des nouveaux exemplaires du véhicule ou de maintenir (production de pièces de rechange) les exemplaires produits.
- ✓ le système de développement doit rester opérationnel (ou pouvoir être rapidement remis en état) pour assurer l'évolution de la définition et le suivi technique des exemplaires en exploitation.

❑ Parmi les systèmes contributeurs, on distingue :

- les systèmes contributeurs utilisés avant la mise en service du système,

Par exemple : systèmes de développement, de production ...

- les systèmes contributeurs utilisés après mise en service,

Parmi ces derniers on peut encore distinguer :

- ✓ les systèmes contributeurs opérationnels, dits aussi systèmes de soutien opérationnel dans certains contextes : ce sont les systèmes contributeurs qui sont indispensables à l'accomplissement des missions du système principal en exploitation, après sa mise en service.
- ✓ les systèmes contributeurs non opérationnels qui sont sollicités hors des situations d'emploi du système principal .

Par exemple, un système de ravitaillement en vol, qui contribue à la réalisation d'une mission à longue distance effectuée par un avion est un système contributeur opérationnel pour le « système avion » considéré comme système principal. Les systèmes de formation des pilotes (simulateurs de vol et de combat), de production des pièces de rechange ou de retrait de vie de l'avion (démantèlement, recyclage) sont des systèmes contributeurs non opérationnels pour ce même système avion.

❑ De manière générale, on appelle **système de soutien logistique** le système regroupant l'ensemble des éléments nécessaires au maintien du système en condition opérationnelle, voir Partie 3, 10.4.

❑ Souvent, certains systèmes contributeurs préexistent au système principal.

On ne conçoit pas une nouvelle usine pour la production de chaque nouveau produit ou un nouveau lanceur pour chaque nouveau type de satellite. Les soutiens logistiques de matériels de même type sont généralement mis en commun, par exemple en ferroviaire : soutien intégré pour l'ensemble du matériel roulant, soutien intégré des systèmes de contrôle-commande et signalisation.

❑ L'ingénierie du système étudié définit les produits du système étudié, mais aussi les produits *spécifiques* nécessaires pour les concevoir, les produire, les vérifier, les exploiter, les maintenir, les retirer du service. Ces produits sont dits **produits contributeurs**. Ils sont utilisés par un ou plusieurs systèmes contributeurs et peuvent correspondre à l'adaptation d'éléments de systèmes contributeurs existant aux spécificités du système principal..

Des outils de test pourront être utilisés en intégration par le projet de développement aussi bien qu'en maintenance par le système de soutien. Une plate-forme d'intégration accueille l'intégration de différents systèmes et est susceptible d'aménagement spécifiques pour chaque système à intégrer.

❑ L'utilisation de systèmes contributeurs fait apparaître de nouvelles contraintes d'intégration. Par exemples : intégration entre système principal et systèmes contributeurs mais aussi intégration des éléments de soutien d'un nouveau produit dans un système de soutien existant. L'IS devra définir les **produits contributeurs** nécessaires à ces intégrations.

Au même titre qu'un nouveau train doit s'intégrer dans le réseau ferroviaire et son système de contrôle, ses éléments de soutien doivent s'intégrer dans les systèmes de soutien du matériel roulant et des systèmes de contrôle-commande.

La Figure 12 (qui reprend et complète la Figure 7) tente de synthétiser ces concepts en schématisant les relations entre l'ingénierie système, le système principal et ses systèmes et produits contributeurs, les projets (ou programmes) pour les développer.

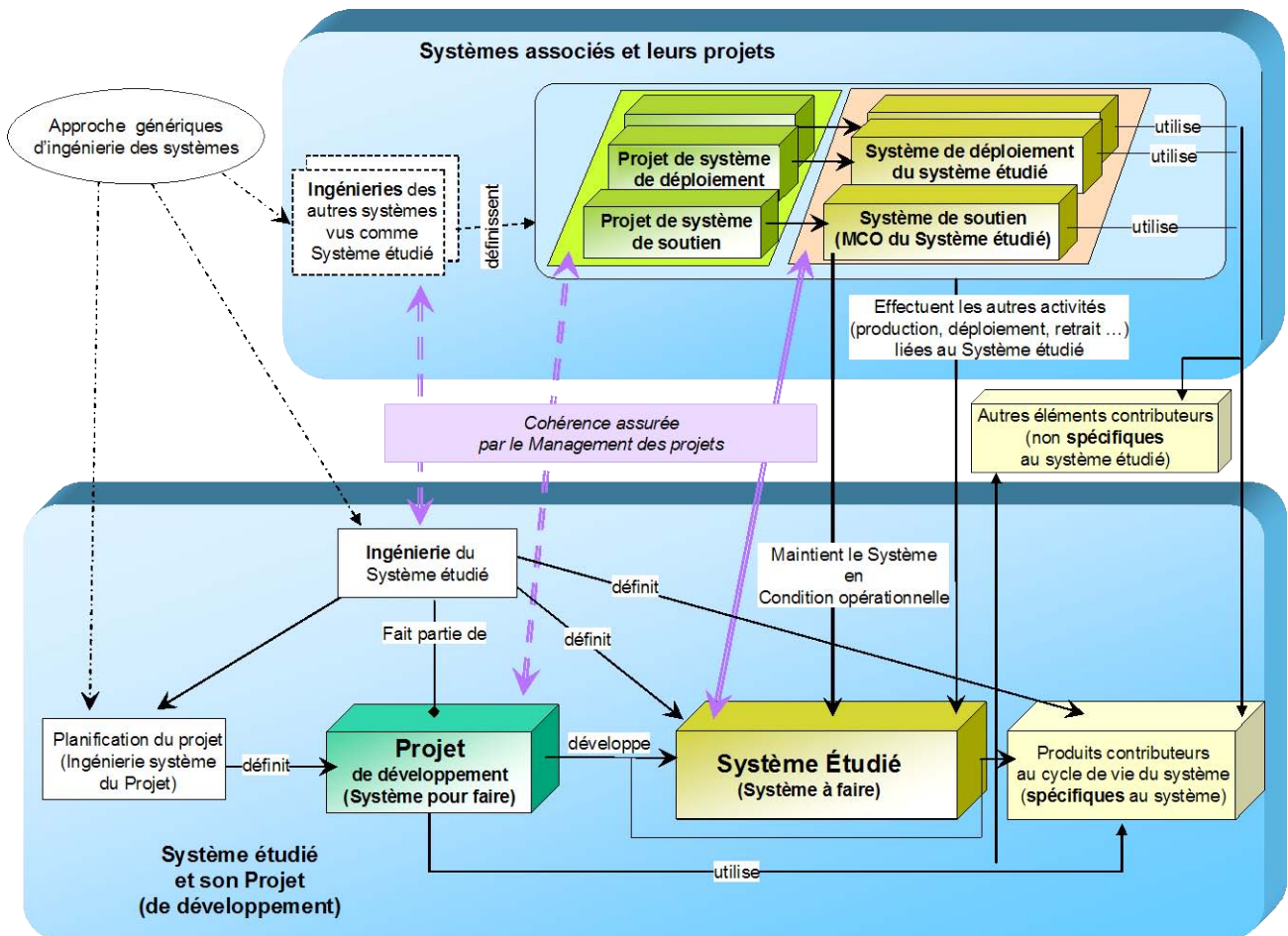


Figure 12 : L'ingénierie système définit les produits contributeurs utilisés par les systèmes contributeurs; ces derniers font l'objet de projets

2.2.3 Le système est piloté

Le fonctionnement du système doit être piloté pour que ce dernier assure les transformations dites opérantes correspondant à sa finalité.

La Figure 13 en donne une représentation traditionnelle séparant le domaine du pilotage du domaine opérant (nous nous permettons, ici, une légère ouverture de la « boîte noire », justifiée par le fait que le pilotage est en relation avec l'autonomie du système par rapport à son environnement).

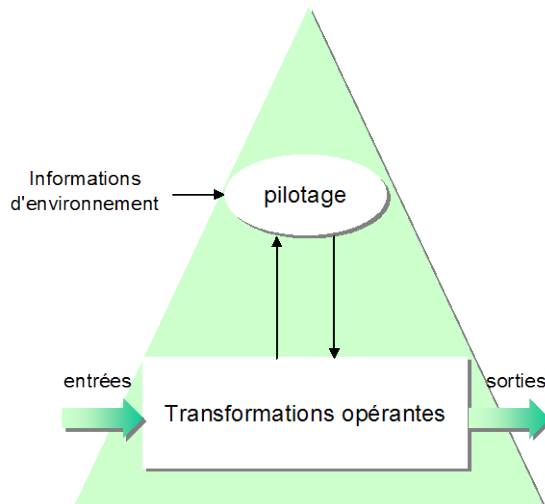


Figure 13 : Pilotage des transformations assurées par le système

Le besoin de pilotage se place à différents niveaux allant de la régulation continue du fonctionnement opérant au pilotage des évolutions majeures du profil de vie.

Par exemple : régulation du fonctionnement continu, réactions opératoires à des événements de l'environnement, changement tactique de profil de la mission, décision stratégique de changement de mission, d'environnement. La terminologie « opératoire », « tactique », « stratégique » est ici donnée à titre d'exemple. Elle dépend des secteurs d'activité.

Tout pilotage intègre des processus de prises de décision qui sont de plus en plus complexes au fur et à mesure que l'on passe de la régulation du fonctionnement au pilotage des évolutions de mission ou d'environnement. Ceci conduira, dans la vision boîte blanche, à hiérarchiser les niveaux de pilotage (voir les paragraphes 2.3.1.4 et 2.3.2, particulièrement la

Figure 16). Notons que les niveaux les plus bas relatifs au fonctionnement sont les plus facilement automatisables, tandis que les niveaux les plus hauts relatifs aux évolutions tels que changement de mission ou d'environnement impliquent généralement l'introduction de l'humain dans les boucles de pilotage, voire d'éléments de décisions d'ordre politique extérieurs au système (généralement émanant de son sur-système).

Ainsi, le pilotage peut être soit interne au système considéré (le système s'autopilote), soit partiellement externe (partiellement car le système a au moins une part d'autopilotage, sinon ce ne serait pas un système), des éléments décisionnels externes au système étant alors introduits dans le boucle. Les parts respectives de pilotage interne et externes caractérisent de manière générale le niveau d'autonomie ou de dépendance du système vis à vis de son environnement : il pilote son fonctionnement (systèmes automatisés), il s'adapte aux modifications de son environnement (systèmes biologiques), il s'autofinalise (certains systèmes sociaux humains).

2.2.4 Synthèse : vue externe du système et ingénierie système

L'approche « boîte noire » consiste à représenter (modéliser) le système plongé dans son environnement. Elle est essentiellement en rapport avec la définition du besoin et des contraintes associées.

Ce sont ce besoin et ces contraintes que l'ingénierie système aide à analyser puis formaliser, en vue de leur donner une solution (étudiée et modélisée par l'approche « boîte blanche »).

➤ Le système doit répondre à un ensemble de besoins et contraintes déclinés à partir de sa finalité

Le système répond à une finalité qui se décline en besoins et contraintes définis dans un ou des environnements également définis.

Les besoins s'explicitent à travers l'analyse des profils de vie (situations d'emploi, profils de mission, scénarios opérationnels) en tenant compte des attentes exprimées par les futurs utilisateurs et exploitants. Ils s'expriment in fine par les services attendus du fonctionnement du système (les transformations de flux qu'il doit réaliser).

Ces besoins s'accompagnent de contraintes imposées au système :

- ☐ Contraintes d'interfaces avec les systèmes et les acteurs de l'environnement.
- ☐ Contraintes dues aux impacts potentiels du système sur l'environnement indirect ou de cet environnement sur le système (depuis les conditions d'ambiance jusqu'aux contraintes réglementaires).
- ☐ Contraintes liées au cycle de vie du système (maintenabilité, recyclabilité des déchets ...)
- ☐ Contraintes économiques (coût de réalisation unitaire, coût global d'acquisition, coût de possession sur tout ou partie du cycle d'exploitation...)

➤ **Besoins et contraintes d'utilisation et d'exploitation ne représentent qu'une partie du problème de l'IS**

Ces besoins et contraintes quelquefois appelées initiaux traduisent les attentes des parties intéressées par l'utilisation et l'exploitation du système dans ses situations de vie et sont en principe indépendantes de la solution.

Le problème de l'ingénierie système est alors de répondre au mieux à ces besoins et contraintes compte tenu des possibilités technologiques et industrielles et des autres aspects du cycle de vie. Il faut donc prendre aussi en compte les contraintes du domaine de la solution, notamment de sa faisabilité, généralement exprimées par les parties prenantes impliquées dans les autres stades ou aspects de la vie du système : conception, développement, production, maintenance, retrait de vie.

Ceci conduit à ajouter de nouvelles contraintes, à vérifier la faisabilité des besoins et contraintes en ajustant éventuellement leurs niveaux d'exigence. En pratique cette approche de faisabilité suppose des choix de concepts de solution.

➤ **Besoins et contraintes font l'objet de compromis et de recherche d'optimisation**

Besoins et contraintes sont souvent en opposition. Ceci implique de rechercher des compromis, en tenant compte des risques : toute croissance d'opposition entre deux exigences augmente le risque de ne pas tenir simultanément les deux.

En particulier, on trouve souvent des gisements d'économie dans l'analyse du rapport utilité sur coût (ou avantage sur coût), idéalement quantifiable en termes de retour sur investissement, appliqué aux besoins et exigences exprimés par les utilisateurs potentiels. Dans le cas où l'estimation s'avère difficile en l'absence de connaissance de la solution, elle peut être reportée à un stade ultérieur du développement via l'introduction de flexibilité dans la formulation des exigences.

Les raisons des choix et compromis effectués font l'objet de justifications.

➤ **Besoins et contraintes doivent être formalisés sous forme d'exigences.**

Chaque service à rendre ou contrainte est précisé au travers de critères : le niveau auquel chaque critère doit être satisfait par le système est défini. C'est le domaine des exigences.

Ainsi, les services peuvent être caractérisés par des niveaux d'exigences temporelles (temps d'attente, durée du service par exemple), des niveaux d'exigences de sûreté de fonctionnement, etc. Certaines exigences peuvent être affectées de marges de flexibilité.

- ☐ Certaines exigences sont impératives : leur non respect peut entraîner la non satisfaction de la finalité ou d'autres risques majeurs. Ces risques, généralement appelés risques système, doivent être analysés et estimés en termes de conséquences potentielles pour le système ou l'environnement, l'IS devant aider à y répondre en définissant des plans d'action de réduction ou suppression de risques.
- ☐ D'autres correspondent à des attentes complémentaires, constituant des marges de flexibilité à analyser en fonction du rapport avantage sur coût.

La sûreté de fonctionnement du freinage d'une automobile est une contrainte impérative nécessitant analyse de risque, le niveau de bruit dans l'habitacle peut être une attente négociable en fonction du prix.

L'ensemble des exigences ainsi obtenues dites **exigences système**, doit ainsi **prescrire** de manière aussi cohérente, complète et réaliste que possible ce que l'on attend du système, c'est à dire ce qu'il doit faire, avec quels niveaux d'exigence il doit le faire, les contraintes qu'il doit respecter et à quel niveau il le doit. Les exigences système servent de référentiel pour la conception de la solution.

Les concepts présentés dans ce paragraphe sont définis et développés en partie 2 ; les processus pour réaliser les activités d'IS correspondantes sont décrits en partie 4.

2.3 Le système : Vue interne

Nous ouvrons la boîte noire, et abordons l'approche « boîte blanche », la vue interne du système.

En adoptant ce point de vue, nous voyons comment le système est constitué et quel est son fonctionnement interne : de manière très générale, un système est alors modélisé comme un ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement.

La constitution du système étudié et les interactions entre ses constituants sont définies pour que le système présente les propriétés et comportements de la boîte noire vis à vis de son environnement décrits au paragraphe 2.2.1.

Système et émergence

Ce qui caractérise, de manière générale, la notion de système, c'est qu'un système est constitué d'éléments en interaction, et qu'il présente des propriétés globales (effets des comportements d'ensemble) non réductibles aux propriétés de ses constituants, mais émergeant du réseau d'interactions entre ses constituants. Ces propriétés sont souvent dites **propriétés émergentes**. Ceci correspond à la propriété de « non sommativité » des systèmes, souvent résumée par formule : « le tout est plus que la somme des parties » (en notant toutefois que des propriétés des éléments peuvent être annihilées au niveau système du fait des interactions).

- ✓ *Remarque : dans l'étude des systèmes naturels (cosmologie, évolution biologique), la notion d'émergence est généralement utilisée pour caractériser l'apparition de propriétés nouvelles au fil de l'accroissement de complexité (émergence de la chimie organique, de la vie, de la pensée...). Par exemple, pour rester dans le domaine de l'ingénieur, l'introduction d'une rétroaction sur une complémentarité dans un circuit logique combinatoire (où les sorties ne dépendent que des entrées) fait émerger une propriété de mémoire, et le fait passer dans la catégorie des circuits séquentiels (où les sorties dépendent des entrées et du temps).*

La complexité des systèmes est souvent caractérisée, au-delà de la complexité intrinsèque des composants et de leur variété, par la complexité du réseau d'interaction, d'où proviennent des comportements émergents tant intentionnels (les synergies recherchées) que non intentionnels, ces derniers pouvant être néfastes et difficiles à prévoir et maîtriser (résonances, interférences, interblocages...).

De façon générale, et notamment dans l'environnement complexe (politique, sociologique, écologique ...) où les systèmes développés à l'aide de l'IS se trouvent immergés, cette complexité dite systémique est appréhendée comme liée à la difficulté à décomposer les problèmes en éléments séparables tout en identifiant les interactions.

En ingénierie des systèmes, notamment pour les systèmes à dominante technologique, nous l'approchons souvent comme liée à la difficulté de prévoir et vérifier tous les comportements possibles du système dans toutes les hypothèses de fonctionnement.

Nous nous proposons d'appliquer ces caractéristiques générales de la vision boîte blanche du « système à faire », en l'approchant du point de vue structurel (décomposition en éléments et reconstitution sous forme d'architecture), du point de vue temporel (décomposition en niveaux d'invariance temporelle induisant une structuration des comportements) et du point de vue pilotage (analyse en niveaux de pilotage et organisation interne du pilotage),

2.3.1 Aspects structurels internes

En ouvrant la « boîte noire », le système est vu sous forme d'un ensemble d'éléments en interaction entre eux et, pour certains, en interaction avec l'environnement.

La description de ces éléments et de leurs interfaces (sièges des interactions) représente la solution apportée au problème posé.

La constitution interne du système peut être approchée selon deux démarches complémentaires :

- ❑ Une démarche analytique correspondant à une **décomposition** du système « boîte noire » en constituants en définissant les interactions entre ces constituants (point de vue "descendant").
- ❑ Une démarche constructrice correspondant à une **composition/agencement** de constituants en les faisant interagir de telle sorte que cette composition corresponde à la boîte noire, (point de vue "ascendant").

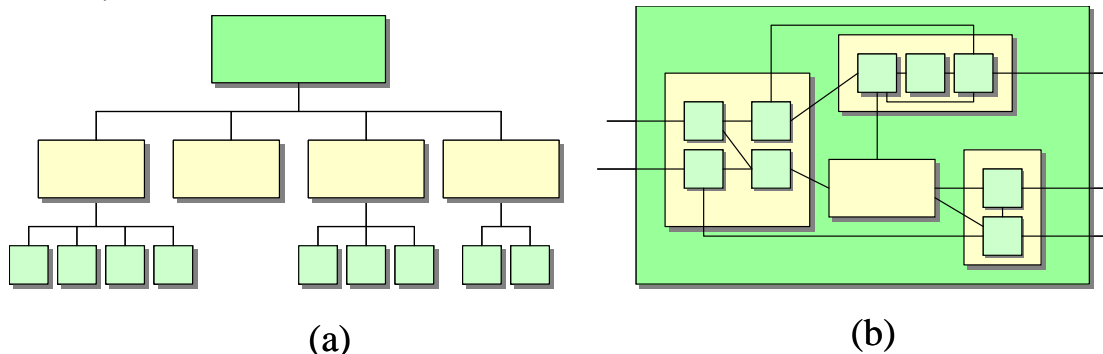


Figure 14 : Aspects structurels internes du système : (a) Décomposition arborescente et (b) Composition, ou Architecture

La **décomposition** en constituants (cf. Figure 14 (a)) et la reconstitution sous forme **d'architecture** agencant ces constituants (cf. Figure 14(b)) peuvent être vues sous l'angle logique (fonctionnel) ou sous l'angle physique (organique) :

- Sous l'angle **logique** (fonctionnel) le système est vu comme une coopération de modules fonctionnels en interaction (réalisant les services attendus avec tous leurs scénarios opérationnels). L'architecture **fonctionnelle** qui en résulte est en principe invariante par rapport aux choix technologiques (à un niveau de composition donné, elle ne préjuge pas du choix des organes pour réaliser les fonctions).
- Sous l'angle **physique** le système est vu comme un ensemble architecturé de constituants physiques en interaction réalisant les fonctions de l'architecture fonctionnelle. C'est l'**architecture organique** ou **physique**. Les constituants, leurs interfaces et les règles régissant leur assemblage sont définis ; les produits contributeurs nécessaires à leurs propres cycles de vie sont également définis.

Pour plus de détails voir la partie 3, chapitre 8.2.

2.3.1.1 Le système se décompose de manière itérative

La **décomposition** d'un système est représentée par une structure arborescente d'éléments se décomposant en éléments de niveau inférieur selon une approche itérative :

- ☐ Un élément de décomposition, peut en effet, avoir les propriétés d'un système (concept de sous-système) et donc pouvoir être lui-aussi décomposé. L'aspect "système boîte noire" s'applique itérativement tant que les éléments de décomposition nécessitent d'être décomposés et présentent les caractéristiques d'un système.
- ☐ Le niveau d'arrêt de la décomposition dépend de l'objectif du modélisateur. Ainsi, la décomposition est généralement arrêtée lorsqu'on aboutit par exemple :
 - à un constituant pour lequel on trouve un produit existant (souvent appelé COTS, *Component On The Shelves*, composant sur étagères) répondant au problème
 - à un élément suffisamment « simple » pour ne plus avoir à le décomposer (sous-traitable à un métier, sans innovation ou ne présentant pas de difficulté de conception...).

Toute décomposition implique recomposition : ce sont les démarches de composition ou d'intégration du système à partir de ses constituants régies par l'architecture.

Remarque : tout constituant de la décomposition peut nécessiter ses propres produits contributeurs (pour le produire, le vérifier, le maintenir...). L'arborescence produit du système comporte donc, à chaque strate de décomposition, les éléments de décomposition du constituant de niveau supérieur et les produits contributeurs nécessaires à son cycle de vie (Voir Figure 37)

2.3.1.2 Décomposition et Architecture du système

Dans la composition ou **architecture** du système, les éléments issus de la décomposition échangent des flux à travers leurs interfaces.

Il est nécessaire d'identifier toutes les interactions entre éléments de la décomposition et entre ces éléments et ceux de l'environnement.

Ces interactions doivent être décrites. Comme elles concernent plusieurs éléments, elles induisent des interfaces entre ces éléments.

On distingue les interfaces internes entre éléments du système et les interfaces externes avec les éléments (autres systèmes et acteurs) de l'environnement, avec les systèmes et produits contributeurs...).

2.3.1.3 Conception de l'architecture du système

La conception de l'architecture du système combine, de manière itérative, les deux démarches descendante et ascendante :

- ☐ démarche descendante : par décomposition fonctionnelle (puis/ou) organique à partir du besoin,
- ☐ démarche ascendante : par composition/agencement architectural à partir de constituants définis ou pré-existants.

Lors de la décomposition, les exigences d'un élément fonctionnel ou organique sont allouées aux éléments de sa décomposition. Les interactions entre éléments de la décomposition sont analysées et les interfaces qui en résultent entre constituants sont définies.

Lors de l'utilisation d'un élément préexistant, il faut vérifier son adéquation, tant au niveau des exigences qu'à celui des interfaces qu'il doit satisfaire. En cas d'adéquation incomplète, il faut définir les adaptations nécessaires.

La partie 3 présente de façon plus détaillée ces aspects de la conception d'un système : décomposition fonctionnelle et organique, conception des architectures fonctionnelle et organique, cahier des charges ou spécification des produits à réaliser ou acquérir (composants du système, produits contributeurs).

2.3.1.4 Le fonctionnement des éléments du système doit être piloté

Les constituants du système et les fonctions qu'ils réalisent doivent être pilotés afin que le système ait les fonctionnements spécifiés face à son environnement dans toutes les conditions d'emploi envisagées. Ce

pilotage comporte la régulation des fonctions continues ainsi que les commandes de déclenchement des fonctions.

Le pilotage détermine la réaction du système aux informations (mesures, événements) qu'il reçoit :

- ☐ Mesures internes ou externes au système pour l'ajustement des variables de régulation
- ☐ Evénements internes au système : fin d'activité d'une fonction, résultat atteint, défaut détecté...
- ☐ Evénements externes rendant compte de modification dans l'environnement opérationnel.

Fonctionnement et pilotage doivent être étudiés conjointement dans une approche d'analyse temporelle interne du système placé dans son environnement d'exploitation. C'est l'objet du point suivant.

2.3.2 Aspects temporels internes

Nous avons vu que, sur le plan structurel, le système se décompose en éléments (sous-systèmes, constituants) à différents niveaux de granularité.

De manière analogue, le comportement des systèmes s'analyse, de façon très générale, en niveaux d'invariance temporelle. On peut, en effet, classer les caractéristiques d'un système par vitesse d'évolution de plus en plus rapide ou par période d'invariance de plus en plus faible, et les regrouper en niveaux d'invariance temporelle allant du niveau le plus stable au niveau le plus fluctuant (voir Figure 15).

Les fluctuations des caractéristiques de niveau $i-1$ provoquent des variations des caractéristiques de niveau i , les lois d'évolution de ces dernières étant conditionnées par les caractéristiques plus permanentes de niveau $i+1$.

En remontant les niveaux, on passe de *caractéristiques conjoncturelles*, où le système réagit aux fluctuations de l'environnement (il fonctionne), aux *caractéristiques structurelles* qui assurent la pérennité du système (il cherche à s'adapter aux évolutions de l'environnement).

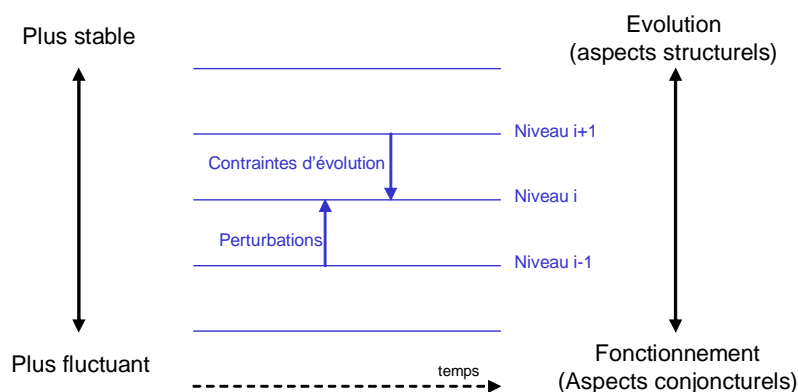


Figure 15 : Niveaux d'invariance temporelle

Dans l'application de ce concept aux systèmes étudiés en IS, la vie opérationnelle s'analyse en **niveaux d'invariance temporelle** pendant lesquelles « l'état » du système reste relativement invariant (suivant le degré de granularité temporelle considéré). Les niveaux de pilotage, introduits dans la vision boîte noire, sont généralement induits par ces décompositions en niveaux d'invariance temporelle.

On distingue généralement, pour des systèmes à dominante technologique, des niveaux tels que :

- ☐ **Le niveau des phases de vie et profils de mission.**

Par exemple, pour un système satellitaire d'observation astronomique : phases de compte à rebours ou de déploiement, phases de fonctionnement opérationnel pour un profil de mission ou de condition d'emploi,

- ☐ **Le niveau des modes de fonctionnement** de chaque phase de vie.

Par exemple, pour chaque profil de mission, le satellite d'observation passe par des modes de préparation de la mission, exécution de la mission, compte rendu de la mission...

- ❑ **Le niveau des états de fonctionnement.** Le processus de fonctionnement pour chaque mode de fonctionnement peut être analysé comme une suite d'états de fonctionnement pendant lesquels s'exécutent des activités continues déterminées. Tout démarrage, arrêt ou modification d'activité correspond à un changement d'état.

Par exemple, dans un mode d'exécution de mission, le satellite enchaîne des états de préparation des détecteurs, de détection avec maintien continu du pointage et stockage des données...

Plus on monte dans cette hiérarchie de niveaux d'invariance temporelle, plus les « états » correspondants du système sont stables, et plus les transitions entre « états » induisent des évolutions importantes (fonctionnelles voire structurelles) du système :

Par exemple, les changements d'état d'un avion sont de plus en plus importants (nécessitent des modifications internes voire des restructurations de plus en plus significatives) lorsqu'on passe de l'état point fixe à l'état accélération en processus de décollage, du mode vol automatique au mode vol piloté, du vol normal au vol en mode dégradé après avarie d'un réacteur, du mode voler au mode rouler (ouverture du train d'atterrissage), d'une période d'utilisation à une période de révision, d'une phase d'emploi de transport passager à une phase d'emploi de transport de fret (re-conditionnement)...

La

Figure 16 illustre l'application des aspects temporels et de pilotage, aux aspects structurels. Elle synthétise ce paragraphe et le 2.2.2 qui précède.

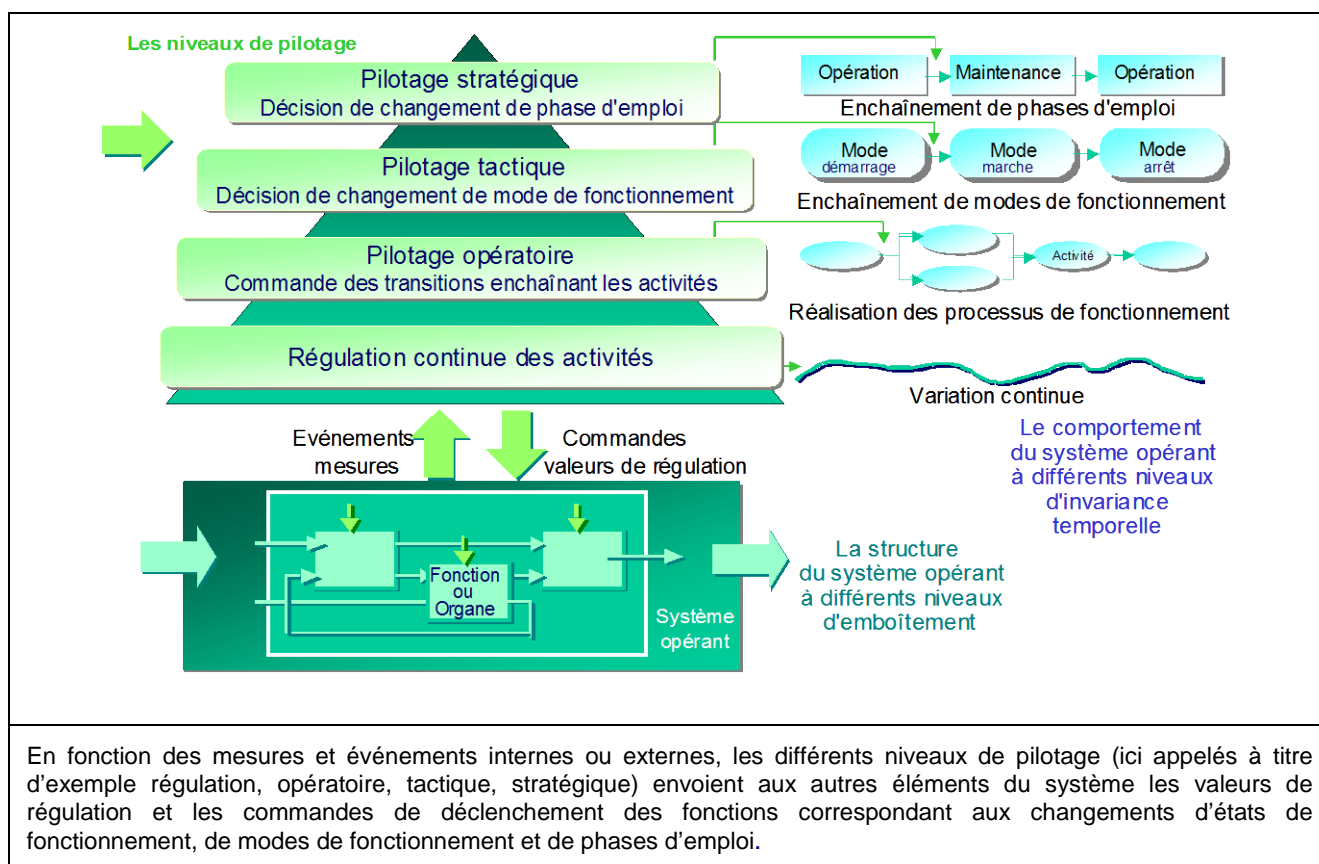


Figure 16 : Vision générale d'un système : application des aspects temporels et de pilotage

2.3.2.1 Le système met en œuvre des scénarios de fonctionnement

Le fonctionnement interne du système conditionne la couverture des services attendus, définis dans l'approche boîte noire dans tous ses modes de fonctionnement, pour tous les scénarios opérationnels, pour tous les profils de mission, dans toutes les phases de vie.

Ceci nécessite :

- ☐ La définition des **lois de régulation** des activités continues.
- ☐ La définition des **enchaînements** fonctionnels des éléments de l'architecture fonctionnelle, avec les conditions de changement d'état de fonctionnement (changement d'activité fonctionnelle et/ou modification des paramètres de régulation de ces activités), ceci dans tous les modes de fonctionnement possibles de toutes les phases de vie.
- ☐ La définition des **scénarios d'enchaînement** de modes de fonctionnement, dans les différents profils de mission, scénarios d'enchaînement des missions dans une phase de vie, scénarios d'enchaînement des phases de vie...

2.3.2.2 Les transitions sont commandées

Les **transitions** faisant passer d'un « état » actuel à un nouvel « état » (nouvel état de fonctionnement, nouveau mode, nouvelle mission, nouvelle phase...) doivent être commandées.

- ☐ Les commandes de transition (souvent traduites sous forme de flux de contrôle) sont élaborées par le système en fonction d'événements externes ou internes au système (conditions de transition).
- ☐ L'effet des commandes est de faire passer le système dans son nouvel « état » (nouvel état de fonctionnement, nouveau mode de fonctionnement, nouvelle mission ou nouvelle phase de vie) et de déclencher les processus ou activités fonctionnelles correspondant à ce nouvel état.

2.3.3 Le système se pilote

Les niveaux d'invariance temporelle induisent des niveaux de pilotage déjà introduits dans le paragraphe 2.2.3. En principe (voir

Figure 16) :

- ☐ En « montant » dans la hiérarchie des niveaux d'invariance temporelle, on passe progressivement de décisions de pilotage fréquentes, à horizon rapproché, à caractère conjoncturel, à effet limité et localisé, liées au fonctionnement du système qui répond aux fluctuations de son environnement, à des décisions plus espacées, à horizon plus lointain, à effet structurel plus global et plus durable, liées à l'adaptation du système à des évolutions de son environnement et/ou de sa finalité (ou du vieillissement du système lui-même).
 - Chaque niveau de pilotage tend à amortir l'effet des perturbations remontées par les niveaux inférieurs pour tenter de d'assurer l'atteinte des objectifs imposés par les niveaux supérieurs.
 - La dénomination des niveaux de pilotage dépend des types de systèmes et secteurs d'activité. Des termes tels que niveaux de régulation, d'action, tactique, opérationnel, stratégique sont souvent utilisés.
- ☐ Sur le plan structurel, le pilotage peut être plus ou moins centralisé ou réparti. Dans le cas de la répartition, le pilotage peut être de type plutôt hiérarchisé ou plutôt coopératif.
- ☐ Dans le cas du pilotage hiérarchisé, il y a une certaine correspondance entre les niveaux de décomposition structurelle et les niveaux de pilotage, les aspects de régulation et de pilotage de fonctionnement pouvant facilement être « descendus » au niveau des composants du système, les décisions d'aspect plus stratégiques étant prises à des niveaux plus globaux. Chaque constituant de l'arbre de décomposition structurelle s'autopilote alors sous la contrainte des commandes de pilotage issues de son constituant père.

- ❑ Dans le cas du pilotage coopératif, il n'y a plus de chef d'orchestre ou de hiérarchie, chaque participant à la coopération se pilotant en échangeant avec ses partenaires de manière à répondre aux objectifs globaux. Différentes formes de pilotage de type coopératif peuvent être utilisés dans les systèmes de systèmes.

2.3.4 Synthèse : vue interne du système et ingénierie système

L'approche boîte blanche est essentiellement en rapport avec la conception de la solution à retenir pour répondre aux exigences systèmes définies dans l'aspect boîte noire.

La conception du système vue globalement consiste à :

- ❑ décomposer itérativement le système en constituants, en déclinant les exigences système sur les constituants et leurs interfaces,
- ❑ développer ou acquérir les constituants,
- ❑ intégrer les constituants pour composer le système en vérifiant la conformité aux exigences. L'intégration est préparée par la conception des architectures et l'élaboration du plan d'intégration.

➤ Cette conception résulte en pratique d'une double démarche descendante et ascendante

Dans le principe, tout processus de recherche d'une solution à un problème nouveau passe par une décomposition itérative du problème en sous problèmes plus simples, impliquant ainsi une recombinaison (intégration) préparée par la conception des architectures. Dans la pratique, on est rarement devant un problème totalement nouveau : on réutilise aussi bien des concepts architecturaux que des éléments de solution préexistants :

- ❑ Le système est décomposé en éléments plus simples en définissant leurs interactions.
- ❑ Cette décomposition est généralement faite d'abord selon le point de vue fonctionnel. Les fonctions à faire sont ensuite allouées à des constituants physiques (les organes).
- ❑ Les feuilles des arborescences des décompositions fonctionnelle ou physique sont réorganisées pour constituer les architectures logique et physique.
- ❑ Les interfaces entre constituants sont déduites des interactions entre constituants.
- ❑ Les scénarios de fonctionnement internes sont analysés pour reconstituer tous les scénarios externes dans tous les modes, dans tous les profils de mission et pour toutes les phases de vie : les flux de contrôle sont définis
- ❑ Cette approche, par principe descendante, tient compte des éléments existants à (ré)utiliser (sous-systèmes existants, composants sur étagères, mais aussi modèles génériques d'architecture ...) et peut s'apparenter pour ces éléments à une approche ascendante à partir de l'existant.

➤ Les exigences sont allouées et tracées

Quelle que soit l'activité de conception à faire, elle a pour entrée les exigences assignées au produit de l'activité.

La maîtrise de la déclinaison des exigences tout au long de la conception est donc un élément clé pour obtenir la conformité de la solution aux exigences système, en vérifiant pas à pas que toutes les composantes conçues et réalisées par les activités sont conformes aux exigences de référence.

La traçabilité des exigences permet notamment d'analyser les impacts des modifications : quels sont les constituants mis en cause par un changement d'exigence initiale ou quelles sont les exigences initiales impactées par des performances insuffisantes d'un constituant, par des limites technologiques ou économiques ?

Au cours de la décomposition, les exigences allouées à un constituant sont réparties sur ses constituants fils :

- ☐ De nouvelles exigences sont induites par les choix de conception et peuvent avoir des impacts remontant jusqu'au niveau système,
- ☐ Les exigences de cycle de vie (de vérification et validation, de production, de maintenance, de retrait de service) sont précisées.

➤ **La solution est optimisée**

L'optimisation est une préoccupation fondamentale de l'ingénierie système. Aux compromis de type utilité sur coût ou avantages sur coût amorcés au niveau de la position du problème (spécification des exigences système) se combine la recherche du meilleur compromis efficacité sur coût de la solution apportée à ce problème.

Comme on ne peut raisonnablement pas développer les différentes solutions possibles puis les comparer, on cherche à s'assurer que les choix successifs contribuent à converger vers une solution optimisée.

- ☐ Les solutions alternatives de décomposition, d'architecture, de choix entre faire ou (ré)utiliser ou encore de choix des composants sont évaluées en termes d'avantages sur coût en tenant compte de leurs impacts sur tout le cycle de vie du système et comparées en tenant compte de leurs risques respectifs. Ces recherches du meilleur compromis supposent une hiérarchisation préalable des objectifs stratégiques (par exemple entre fonctionnalité, marges sur performances attendues, sûreté de fonctionnement, coût de cycle de vie, délais de mise sur le marché...). Le coût de ces études d'optimisation est lui-même optimisé (il s'agit de faire le juste nécessaire).
- ☐ Les raisons des choix font l'objet de justifications.

➤ **La conception prépare l'intégration et se complète au cours de celle-ci**

- ☐ Toute décomposition implique recombinaison : c'est l'intégration complétée par les opérations de vérification, validation et qualification (ou IVVQ : intégration, vérification, validation, qualification)
- ☐ Les constituants réalisés sont vérifiés par rapport à leurs exigences de réalisation et validés par rapport à leurs exigences de besoin, puis intégrés avec d'autres pour former un constituant de niveau supérieur qui sera également vérifié et validé.
- ☐ En final, le système est vérifié et validé par rapport à ses exigences et enfin sa définition sera qualifiée après les essais de qualification démontrant son aptitude opérationnelle.
- ☐ Les problèmes rencontrés peuvent impliquer des retours en conception.

Les concepts présentés dans ce paragraphe sont définis et développés en partie 3 ; les processus pour réaliser les activités d'IS correspondantes sont décrits en partie 4.

3 LE SYSTEME POUR FAIRE LE SYSTEME ETUDIE : LE PROJET

Pour organiser, exécuter et coordonner toutes les activités qui conduisent de l'énoncé de la finalité à la réalisation et à la mise à disposition du système à faire (ou système étudié), il est nécessaire de mettre en place un système doté de ressources humaines et techniques : le « **système pour faire** ». Ce système, est organisé sous forme d'un ou plusieurs projets.

La notion de projet est très générale.

La définition donnée par ISO 9000-2005 (NFX 50-130) est : processus unique qui consiste en un ensemble d'activités coordonnées et maîtrisées comportant des dates de début et de fin, entrepris dans le but d'atteindre un objectif conforme à des exigences spécifiques, incluant les contraintes de délais, de coûts et de ressources.

La maîtrise du cycle de vie d'un système nécessite la mise en place de plusieurs types de projet (études préliminaires, développement, production, déploiement, démantèlement...). Tous peuvent exploiter une approche d'IS.

Parmi ces types de projet, il en est un qui nous intéresse particulièrement : le type de projet ayant pour objectif de concevoir et développer un système répondant à un besoin (ceci pouvant s'appliquer au système à faire, à un constituant de ce système ayant des caractéristiques de système, à un produit contributeur ayant les caractéristiques d'un système). C'est pour ce type de projet qu'ont été initialement définis les concepts, méthodes et outils spécifiques de l'ingénierie système. C'est donc ce type qui est présenté dans ce chapitre.

Les concepts présentés sont largement généralisables aux autres types de projets concourant à la maîtrise du cycle de vie d'un système, comme le montre l'évolution des normes d'IS au cours du temps (La première norme, IEEE 1220 (Version 1 en 1994), ne couvrirait que les processus allant de l'analyse des besoins au développement, la dernière en date, ISO 15288 (Version 1 en 2002), couvre tous les processus du cycle de vie).

On note que le projet de développement peut se décomposer en phases successives conduisant à des états intermédiaires de la définition du système, ces phases pouvant souvent être considérées comme des projets (projet d'étude des besoins, projet de spécification, projet de conception, projet de développement, projet de fabrication d'un prototype), tandis que la conception et le développement des constituants du système ou de leurs produits contributeurs peuvent également faire l'objets de tels projets.

Projets, programmes, lignes de produits

Le projet de conception et développement d'un système s'inscrit dans un cadre plus large souvent appelé programme.

Le terme de **programme** est généralement utilisé pour désigner l'ensemble coordonné des projets nécessaires à la maîtrise du cycle de vie d'un système.

Il s'applique bien dans la vision de l'acquéreur de systèmes complexes novateurs qui doit coordonner de multiples projets. Par exemple : système dont des composantes sont confiées à des maîtres d'œuvre distincts, ou sont utilisées par d'autres projets ou programmes indépendants, ou encore ont chacune leur propre cycle de vie. Il désigne alors l'ensemble coordonné des projets couvrant l'acquisition et la gestion d'un système répondant au besoin, de l'expression de la finalité au retrait de vie. L'acquisition d'un nouveau type de système d'arme ou d'une nouvelle capacité de production électrique nucléaire en sont des exemples.

Il peut aussi s'appliquer dans le cas d'un industriel concevant et développant un nouveau type de produit complexe en vue de sa commercialisation. Reste que bien souvent il est difficile de prévoir quels seront les futurs clients et leurs besoins spécifiques de particularisation ou quelle sera l'évolution du marché pour un produit standard et donc de concevoir l'ensemble des projets à venir comme un programme coordonné. On préférera souvent au terme de programme le terme de **lignes de produits**, définissant un socle d'éléments conceptuels (architecture) ou matériels (produits constituants et produits contributeurs) standards ou

adaptables, permettant des particularisations rapides et au moindre coût aux besoins clients ou des évolutions et créations de variantes du produit en fonction de l'évolution du marché. La coordination au niveau ligne de produits garantit la maîtrise et l'optimisation des améliorations apportées aux éléments du socle commun au fil des nouveaux projets en gérant les impacts de chaque modification sur toutes les particularisations et variantes issues de la ligne de produits. Les industries aéronautique ou ferroviaire pour les produits susceptibles de particularisation ou automobile pour les produits aux multiples variantes en donnent des exemples. Les équipementiers, tels que les producteurs de réacteurs d'avions pour l'industrie aéronautique, en donnent également des exemples.

A noter les impacts réciproques entre programmes d'acquisition du maître d'ouvrage et programmes ou lignes de produits chez l'industriel : par exemple, l'acquisition d'une nouvelle capacité de production électrique nucléaire par un fournisseur d'énergie peut entraîner le lancement d'un projet (programme) à l'origine d'une nouvelle ligne de produits chez un producteur de chaudières nucléaires, ou des améliorations à une ligne de produits existante.

Les programmes et lignes de produits font l'objet de développement dans la partie 4.

Pour simplifier les idées, nous traitons dans ce chapitre des éléments communs aux projets comprenant l'analyse des besoins, la spécification, la conception et le développement d'un système ou d'un de ses produits ayant des caractéristiques de système (constituant, produit contributeur) qui conduisent à la mise à disposition du produit ou d'un prototype. Nous l'appelons « le projet ».

Ce « projet », traité dans ce chapitre comme **projet de développement d'un système**, met en valeur tant les caractéristiques communes à tout projet que certaines spécificités propres à la mise en œuvre de l'ingénierie système.

Tout projet est lui-même un système auquel les concepts généraux des systèmes, présentés précédemment à propos du système à faire, sont applicables.

Ce chapitre a pour but de présenter sommairement cette application des concepts systèmes au « projet », en mettant en évidence ce qui relève du domaine général de tout projet et ce qui relève du domaine propre de l'IS.

Rappel : Les relations entre IS, système à faire et système pour faire, sont présentées au chapitre 1 de la présente partie (voir en particulier la Figure 7 et aussi le paragraphe 2.2.2.3).

3.1 Préalable : le projet est un système

Le projet pour concevoir et développer un système (passer d'une finalité à un système y répondant) peut être décrit comme un ensemble d'équipes et de moyens techniques coopérant en vue de cet objectif. Ceci correspond à la définition d'un système (ici à dominante organisationnelle), telle qu'elle a été exposée au paragraphe 1.1. Comme pour tout système, le projet peut être vu sur le plan fonctionnel, en l'espèce comme un ensemble d'activités coordonnées (ce que fait le projet) et sur le plan organique, en l'espèce comme un ensemble d'entité organisationnelles dotés de moyens techniques (ce qu'est le projet).

La suite de ce chapitre va donc reprendre la structure du chapitre 2, pour montrer comment les concepts qui y sont présentés dans le cas du système à faire (à dominante technique) s'appliquent au système pour le faire (à dominante organisationnelle).

Notons que le projet de conception-développement d'un système que nous prenons comme exemple est traité ici comme un projet unique, mais qu'il peut faire l'objet de sous-projets successifs.

Dans le contexte du projet, l'ingénierie système donne les approches méthodologiques pour définir développer, vérifier et faire évoluer la définition du système à faire et le faire passer au stade de l'exploitation.

A l'intérieur du projet, trois types d'activité concourent à l'atteinte des objectifs fixés :

- ☐ Les activités techniques d'IS ou d'ingénierie, qui définissent les produits à réaliser et les activités techniques de réalisation. Les entités sur lesquelles elles travaillent sont celles qui constituent la définition du système et sa réalisation.

- ☐ Les activités de management qui définissent l'ensemble des tâches du projet, dont celles correspondant aux activités d'ingénierie, et les ressources (méthodologiques, humaines, matérielles et organisationnelles) qui leur sont nécessaires, elles pilotent et contrôlent les travaux de réalisation.
- ☐ Les activités de support technico-administratif des activités précédentes.

De manière simplifiée, le management du projet consiste à :

- ☐ « faire l'ingénierie » du (système) projet : c'est le rôle de la planification du projet qui l'organise et le définit, sous la forme de l'ensemble des plans du projet :
définir les exigences du projet : objectifs et contraintes (le pourquoi ?), le décomposer fonctionnellement en tâches à accomplir en allouant les objectifs en précisant le contenu des tâches (le quoi ? ce que doit faire le projet), estimer les ressources nécessaires aux tâches en tenant compte des contraintes budgétaires et de délais (avec quoi ?), ordonnancer et planifier les tâches (quand ?), définir l'organisation du projet (l'architecture organique, ce qu'est le projet) et allouer les tâches aux éléments de l'organisation (avec qui ?).
- ☐ « exploiter » le système (projet) ainsi défini (planifié) : c'est le rôle de la conduite du projet,
lancer les activités planifiées en allouant les ressources, suivre, réagir aux écarts entre réel et planifié, maîtriser les risques, la qualité...

Le management de l'IS est la partie du management spécifique à l'IS : elle consiste à planifier et conduire les activités d'IS (démarches d'IS) dans le cadre du projet.

Management de l'IS et management de projet sont ainsi complémentaires et indissociables : c'est le management de l'IS qui définit les activités techniques à réaliser et leurs besoins en ressources, c'est le projet qui les met en œuvre en leur attribuant les ressources nécessaires.

Notons que le management de l'IS se place également au niveau de l'entreprise : il s'agit de manager ce qui est commun aux différents projets mettant l'IS en œuvre, et de créer l'environnement favorable (investissements, méthodes et outil, management des ressources humaines et des connaissances, amélioration des processus...).

Ces points sont approfondis en partie 4 chapitres 14.3 et 14.4.

Le plan du présent chapitre est identique à celui du chapitre 2 précédent pour bien montrer la cohérence de l'approche système appliquée au projet pour faire et au système à faire.

3.2 Le Projet : Vue externe

Selon ce point de vue, le Projet est vu comme boîte noire :

- ☐ il a une finalité,
- ☐ il est plongé dans un environnement avec lequel il interagit et qui le contraint
- ☐ il se décrit sous l'angle temporel comme un processus conduisant progressivement au résultat.
- ☐ ce processus doit être piloté

Nous nous intéressons ici aux relations entre le Projet et son environnement, non à la manière dont le Projet est agencé.

3.2.1 Aspects externes

3.2.1.1 Le Projet répond à une finalité

Tout projet a une finalité : Obtenir un résultat (ici le système répondant à un besoin donné) dans des contraintes économiques et temporelles données. Cette finalité se décline en objectifs (analogues à des exigences initiales) du projet : résultats à obtenir, contraintes à respecter (notamment de budget et délais pour les obtenir).

Remarque : Nous nous intéressons ici au projet de conception-développement d'un système (ou d'un sous-système). Ce projet, vu dans sa globalité met généralement en œuvre un acquéreur (appelé maître d'ouvrage dans le cas du système complet) et un fournisseur (alors appelé maître d'œuvre). On peut l'analyser sous forme de deux projets concourants : le projet de l'acquéreur chargé d'exprimer un besoin et d'acquiescer un système répondant à ce besoin et celui du fournisseur, chargé de concevoir, développer et fournir un système apportant une solution à ce besoin. Ces deux projets ont chacun leur finalité : l'obtention du système répondant aux besoins dans les contraintes de prix et délais fixés, pour le projet de l'acquéreur, la fourniture du système satisfaisant les besoins et contraintes de l'acquéreur, tout en optimisant les coûts et délais pour le faire, pour le projet fournisseur. Ces deux projets doivent être coordonnés généralement sur des bases contractuelles.

Ce concept de finalité permet une toute première présentation du projet (quitte à entrouvrir très légèrement la boîte noire pour une meilleure compréhension).

Dans une vision fonctionnelle (ce qu'il fait), le projet est un **processus** qui, globalement, fait passer des objectifs à leur réalisation. Ce processus met en jeu les processus et activités de la démarche d'ingénierie système ajustés aux besoins du projet. Ces activités nécessitent des **ressources** humaines et matérielles qui consomment progressivement le budget du projet et le délai qui lui est imparti.

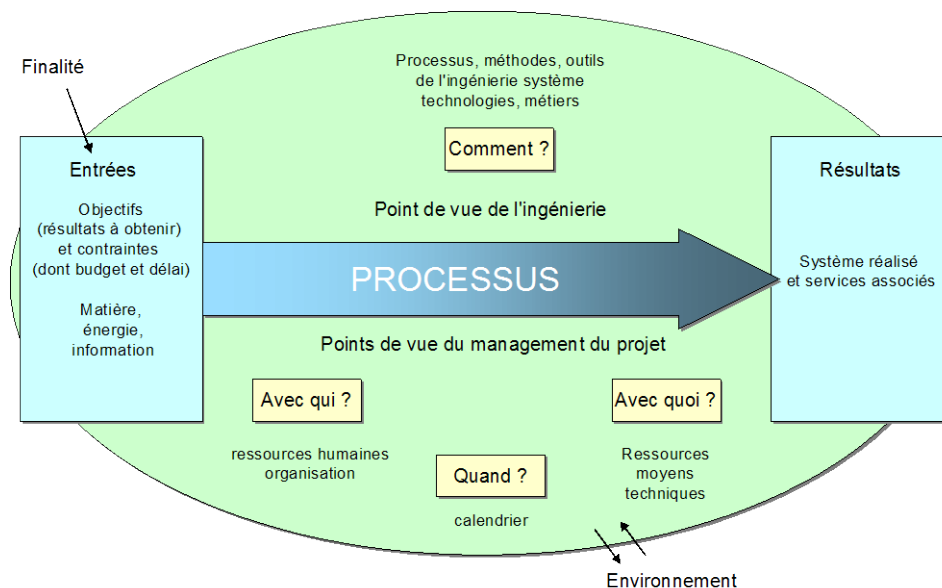


Figure 17 : Sur le plan fonctionnel le projet est un processus d'ingénierie - Il doit être managé

L'ingénierie système aide ainsi à définir le comment ? (comment faire les transformations entre entrées et résultats du processus),

Le pilotage (management) du projet gère le avec qui et avec quoi ? (compétences humaines et moyens méthodologiques et matériels pour faire les activités de transformations en respectant les contraintes de budget), ainsi que le quand ? (dans le respect des contraintes de délais).

Dans la vision organique (ce qu'il est), ce processus s'incarne dans une organisation. En entrouvrant la boîte noire, le projet est vu comme un ensemble **d'équipes** avec leurs moyens techniques **en interaction** entre elles et avec l'environnement, **coordonnées** pour réaliser les activités du processus.

3.2.1.2 Le Projet est plongé dans un environnement

Les projets se placent dans des environnements complexes qui diffèrent suivant les cas (maître d'ouvrage acquérant un système spécifique, systémier le réalisant, sous-système chargé d'un sous-système majeur, industriel développant des produits complexes, consortium d'entreprises coopérantes) et peut mettre en œuvre une organisation industrielle complexe. Le projet est donc en interaction avec de multiples entités organisationnelles qui contribuent au projet, tout en ayant chacune de multiples besoins et contraintes susceptibles d'impacts sur le projet.

La Figure 18 illustre de manière générale les principaux types d'éléments en interaction avec un projet réalisé au sein d'une entreprise (par exemple une entreprise ayant un projet de conception-développement d'un sous-système dans le cadre d'un consortium d'entreprises assurant la maîtrise d'œuvre d'un système global), en suggérant les types de contraintes supportées par ces éléments et répercutées sur le projet (en laissant au lecteur le soin d'imaginer les apports)

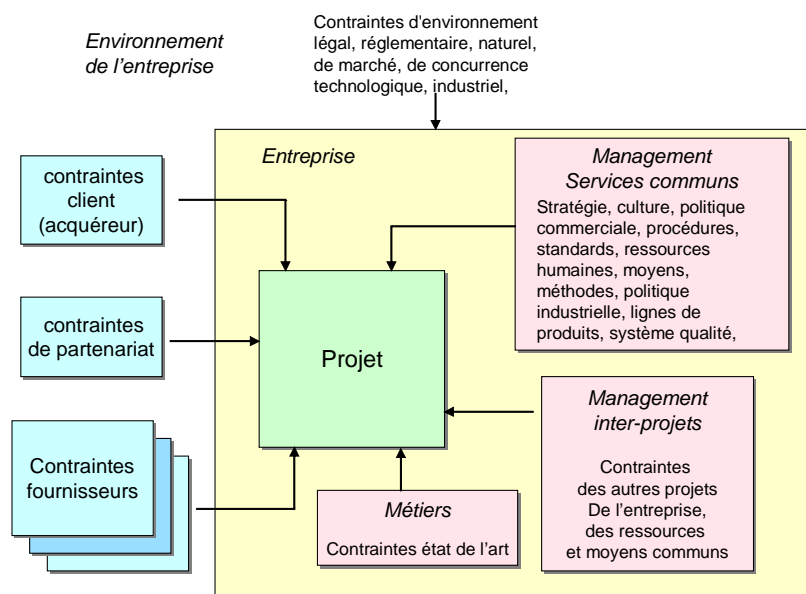


Figure 18 : Environnement des projets et contraintes associées (vus dans le contexte d'une entreprise)

3.2.1.2.1 L'environnement direct du projet : interactions et interfaces

Il s'agit de l'environnement avec lequel le projet présente des **interactions**, via des **interfaces organisationnelles** (qui peuvent être hiérarchiques, fonctionnelles, contractuelles ...). Ainsi un projet tel que celui de la Figure 18 interopère avec :

- ☐ le programme dans lequel s'inscrit le projet, qui apparaît alors comme le système englobant du projet considéré, notamment avec le projet du client, acquéreur du résultat du projet, les partenaires dans le consortium et les autres projets du programme,
- ☐ le management et les services généraux de l'entreprise,
- ☐ les différentes entités opérationnelles (études, production, achat) et métiers (électronique, mécanique, informatique...) et le cas échéant les lignes de produits de l'entreprise, en fonction de son organisation,
- ☐ les fournisseurs du projet (sous-traitants, équipementiers...),
- ☐ éventuellement avec d'autres projets réalisés indépendamment par l'entreprise (interactions dues, par exemples à des ressources partagées).

3.2.1.2.2 L'environnement indirect du projet

Le projet s'inscrit dans un environnement technique, économique, industriel, légal, réglementaire qui impose des contraintes qui s'appliquent tant au projet qu'aux acteurs et moyens industriels qui y participent ou avec lesquels le projet est en relation. Le projet reçoit ainsi un nouvel ensemble d'exigences qui s'ajoutent à celles concernant le système à faire et aux contraintes de coût et délais. Notons que les différents acteurs ont chacun leurs propres objectifs et contraintes qui s'avèrent souvent antagonistes : il convient de gérer ces antagonismes de façon à ce qu'ils ne deviennent pas conflictuels entre acteurs et avec les objectifs du projet.

3.2.2 Aspects temporels externes

Etant, par définition, un processus en interaction avec de nombreux environnements, le projet est par principe en constante évolution, tant parce que l'évolution est inhérente au concept de processus, que parce que les environnements sont susceptibles d'évolutions.

Ainsi, au cours de son déroulement, le projet va rencontrer différentes situations prévues ou imprévues, auxquelles il devra faire face. Il doit donc être conçu et piloté pour pouvoir, au long de son déroulement, adapter au mieux son comportement (aspect fonctionnel) et son organisation (aspect organique) à toutes les situations planifiées ou envisageables.

Notons dès maintenant que c'est le rôle du management des risques d'analyser les risques d'événements indésirables pour le projet en termes de probabilité d'occurrence et coût des conséquences, et de prévoir les parades pour en limiter les effets.

3.2.2.1 Le Projet a un cycle de vie

Le projet a un cycle de vie, qui peut s'analyser ainsi :

- ☐ En début et en fin de cycle de vie les étapes d'initialisation et clôture du projet ;
- ☐ En cours du cycle de vie, des étapes correspondant :
 - à des activités de définition du projet, que nous désignons par le terme général de planification,
 - à des activités de réalisation du projet, qui doivent être conduites en conformité au plan.

3.2.2.1.1 L'initialisation du projet

L'initialisation correspond à la création du projet. Elle résulte de la décision de lancer le projet pour répondre à une finalité donnée. Elle précise la finalité en termes d'objectifs et de contraintes et assure la toute première mise en place.

Le lancement d'un projet résulte d'une volonté politique et d'une décision stratégique

Ce chapitre traite du projet de développement une fois lancé, c'est-à-dire après définition de ses objectifs.

Il n'aborde pas des stades très en amont partant de l'émergence d'un besoin, passant par la maturation d'idées concernant la finalité d'un système susceptible d'y répondre, jusqu'à ce qu'une autorité prenne en compte le problème et envisage de lancer un projet (ou programme) de développement d'un tel système en en formalisant la finalité.

Exemple : maturation de la finalité des grands appareils expérimentaux internationaux (accélérateurs, collisionneurs, systèmes d'observation astronomiques terrestres ou spatiaux...) par des équipes de physiciens théoriciens et expérimentateurs, par ailleurs en forte concurrence.

De manière générale, la décision effective de lancer un projet de développement d'un nouveau système n'est pas prise sans avoir défini et justifié les objectifs du projet en termes de faisabilité et d'opportunité dans le contexte de la politique de l'entreprise et sans la volonté de les atteindre. Il y a donc, à la suite de la période initiale d'émergence du besoin et avant de lancer le projet de conception-développement, des projets préalables de faisabilité et d'opportunité (avants-projets, études amont, développement exploratoire) pouvant

inclure la réalisation de démonstrateurs.

De même pour le maître d'œuvre ou un sous-traitant chargé du développement d'un sous-système, la décision de s'engager dans le projet résulte d'une décision stratégique en conformité à sa propre politique et après vérification de faisabilité du projet dans les contraintes imposées.

3.2.2.1.2 La planification du projet

La planification correspond à « l'ingénierie » du projet (ingénierie du système pour faire). Son résultat est la définition du « système-projet » formalisée sous forme des plans du projet. La planification comprend les activités suivantes :

- ☐ Définir les objectifs et contraintes (économiques, temporelles et d'environnement) du projet,
opération analogue à l'analyse des besoins et la spécification des exigences initiales pour le système à faire.
- ☐ Décomposer fonctionnellement le projet en processus, activités puis en tâches à accomplir en allouant les objectifs,
opération analogue à la décomposition fonctionnelle et l'allocation des exigences aux fonctions pour le système à faire
- ☐ Estimer les ressources (méthodes, compétences, moyens humains et techniques quantifiés) nécessaires aux tâches,
opération analogue à la recherche et l'évaluation des technologies ou caractéristiques des produits aptes à supporter les fonctions du système à faire.
- ☐ Ordonnancer les tâches en fonction de leurs dépendances et les planifier en fonction des contraintes (économiques, de délais, de disponibilité des ressources),
opération analogue à l'analyse temporelle (fonctionnement et évolution) du système à faire. Notons que c'est trois dernières opérations définissent la vision fonctionnelle du système-projet : ce qu'il doit faire, avec quels types de ressources et avec quel déroulement temporel.
- ☐ Définir ou compléter (elle est souvent partiellement définie préalablement en fonctions de choix politiques ou de stratégie industrielle) l'organisation industrielle du projet et allouer les tâches aux acteurs,
opération analogue à la conception de l'architecture physique avec projection des fonctions sur les organes du système à faire .

Ceci appelle quelques commentaires :

Le terme de « planification » pour qualifier « l'ingénierie de projet » doit être compris au sens large comme l'élaboration de la « définition » du système-projet (son architecture fonctionnelle et son architecture organisationnelle) et non pas au sens restreint de son planning. Cette définition du projet est formalisée sous la forme des plans du projet.

Une grande part des données de planification est fournie par l'ingénierie du système à faire : les objectifs du projet, les produits à réaliser, donc les processus, activités et tâches techniques pour les réaliser, leur estimation en terme de ressources et moyens, leur ordonnancement. De plus l'IS aide à déterminer les bonnes pratiques des activités, les méthodes et compétences à utiliser. On en tire d'emblée deux conséquences :

- 1) le management de projet ne peut être dissocié de l'ingénierie système, on devra préciser leurs rôles respectifs, en indiquant dès maintenant que c'est à l'ingénierie de faire et suivre les plans techniques et au management de projet de faire et suivre les plans de management,*
- 2) la planification est par principe itérative : on doit planifier l'ingénierie qui donne les éléments pour faire la planification. Ceci conduit à une structuration du management de projets en niveaux.*

Aussi logique que puisse apparaître l'ordonnancement des opérations de planification citées ci-dessus, l'ingénierie du projet, comme l'ingénierie du système qu'il développe, a un caractère fondamentalement systémique, notamment du fait de la recherche d'optimisation globale système à faire projet pour le faire.

3.2.2.1.3 Le déroulement du projet

Le déroulement du projet correspond à l'exploitation du (système) projet ainsi défini pour développer le système à faire. Ce stade est donc assimilable au cycle de développement du système. Les activités techniques conduisant au produit du projet y sont réalisées et managées conformément aux plans du projet.

3.2.2.1.4 La clôture du projet

La clôture correspond à l'achèvement du projet, y compris pour un projet ayant échoué. Il s'agit certes du « démantèlement » du projet (retrait des équipes et des moyens affectables à d'autres activités), mais aussi de conserver, au-delà du résultat du projet (à savoir la définition du système et des processus et produits contribuant à la suite de son cycle de vie), les éléments utiles à la reprise éventuelle de la conception en cours de vie, ainsi que les retours d'expérience ou éléments capitalisables utiles à l'entreprise ou à ses projets ultérieurs. En fait, aussi longtemps que des exemplaires du système sont en exploitation, le démantèlement du projet ne peut être considéré comme complet, le processus de développement continue mais avec une équipe différente (entité en charge de l'évolution de la définition du système en relation avec le maintien en condition opérationnelle) ou avec la « même équipe » mais alors fortement limitée en ressources.

3.2.2.1.5 La vision temporelle du cycle de vie projet

De manière générale, on acquiert de la connaissance sur le projet tout au long de son déroulement, tandis que des évolutions de l'environnement sont susceptibles, à tout moment, d'impacts sur les objectifs du projet ou son déroulement. Planification et déroulement du projet ne peuvent donc être placés strictement en séquence (par exemple, on ne peut planifier de manière détaillée l'intégration d'un système et les développements des produits contributeurs à l'intégration que lorsque l'architecture a été conçue et que les constituants à intégrer ont été spécifiés). Inversement, la (re)planification continue en fonction d'éléments non prévus émanant du projet et de l'environnement rendrait le projet non maîtrisable.

Plus spécifiquement, le projet de développement d'un système fait passer le système (sa définition) par différents stades successifs, par exemple : besoins spécifiés (cahier des charges), système spécifié (exigences système), système conçu (architecture et constituants spécifiés), système développé (constituants conçus), système intégré... le niveau de définition acquise lors d'un stade sert de référentiel pour le passage au stade suivant.

Ces deux types de considérations conduisent à un découpage temporel de tout projet d'importance en phases, chaque phase amenant à un sous-objectif défini. Pour un projet de conception-développement d'un système, le phasage correspond généralement à l'obtention des stades successifs de la définition. Ce découpage en phases définit le cycle de vie du projet.

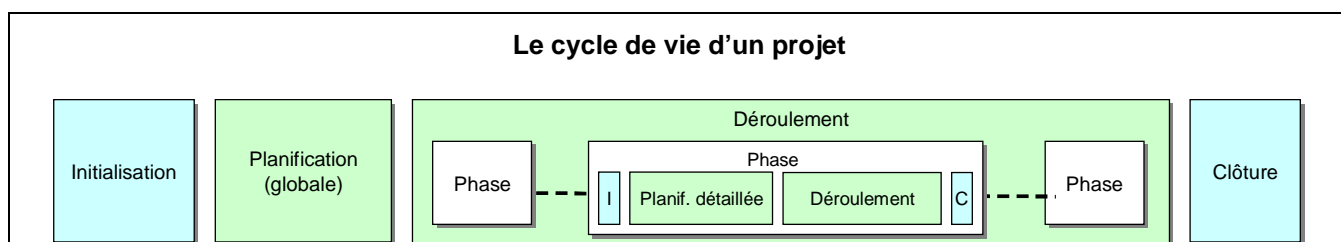


Figure 19 : Exemple de cycle de vie d'un projet

La Figure 19 illustre, de manière générique, le cycle de vie de tout projet. Le projet est initialement planifié de manière globale : décomposition en phases (souvent selon un cycle de vie du projet préalablement donné avec des jalons choisis) avec organisation générale du projet et planification grossière des différentes phases. Chaque phase comporte, après son lancement une étape de planification détaillée de la phase, une étape de réalisation, une étape de clôture. Dans le principe, l'étape de clôture valide les réalisations de la phase et donne autorisation de lancer la phase suivante. Dans la pratique, les stades de (re)planification et de déroulement se chevauchent souvent, car il faut réajuster la planification à l'état constaté ou prévisionnel du

projet voire à de nouveaux objectifs ou contraintes, tout en optimisant l'utilisation des ressources.

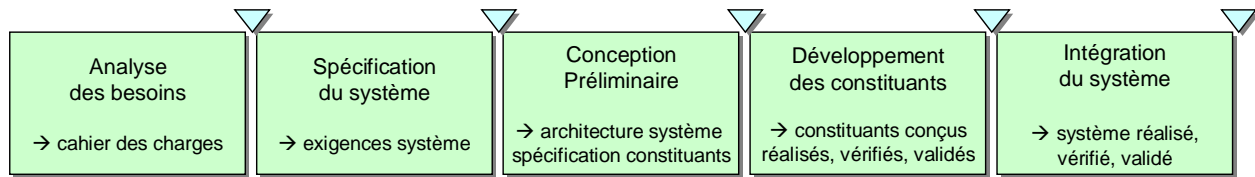


Figure 20 : Exemple de cycle de vie du projet de développement d'un système unique

La Figure 20 illustre, à titre d'exemple, un cycle de vie typique d'un projet de développement d'un système, réalisé en un exemplaire unique. Ce cycle de vie du projet est appelé cycle de développement du système, quand il recouvre effectivement l'ensemble des activités d'analyse des besoins, de conception et de développement du cycle de vie du système.

Chaque phase du cycle de vie définit, à partir du référentiel constitué lors des phases précédentes, le référentiel pour réaliser la phase suivante. Cette nouvelle phase peut alors être planifiée puis conduite selon le plan ainsi défini en s'appuyant sur un référentiel stable. La stabilité des référentiels et donc leur validation en fin de phase tant vis à vis des défauts ou d'insuffisances dues au projet, que vis-à-vis des évolutions d'objectifs et d'environnement est donc cruciale. On note en effet que toute modification de référentiel impose d'autant plus de réfections (est donc d'autant plus coûteuse en termes de budget et de délais) qu'elle remet en cause un référentiel plus en amont car on est alors obligé de reprendre des travaux sur plusieurs phases en tenant compte de tous leurs impacts. On peut admettre pour des raisons économiques et de délais certains recouvrements de phase, mais avec prudence : une modification du référentiel est d'autant plus coûteuse qu'on est plus avancé dans la phase qui l'utilise.

En matière de management stratégique du projet, les jalons de fin de phase ont un rôle majeur pour la maîtrise de la qualité de la conduite du processus : définition des attendus ou livrables de la phase, vérification de ces livrables, condition d'acceptation conditionnant la poursuite du projet.

On note également que les fins de phase représentent des points de discontinuité dans l'évolution du projet : on n'utilise ni les mêmes compétences ni les mêmes moyens en analyse des besoins des parties prenantes utilisatrices et exploitantes, en conception d'architecture ou en intégration.

Tous les projets de développement ne suivent pas un cycle linéaire strict comme celui de la Figure 20, ne serait-ce que parce qu'il n'est pas toujours possible de définir le besoin ou de concevoir l'ensemble du système au départ. Le projet est alors décomposé en éléments de projets suivant chacun le cycle linéaire.

- ☐ Le cycle de la Figure 20 peut se répéter pour réaliser successivement un ou des démonstrateurs pour valider des besoins fonctionnels, un ou des prototypes pour valider la conception, des exemplaires de préséries ou le premier de série pour valider l'industrialisation et le système de production.
- ☐ Un projet conduit selon un cycle de vie "en spirale" peut être vu comme un ensemble de projets, chacun répondant aux principes de la Figure 20, déroulés successivement ou avec des recouvrements planifiés pour fournir des versions successives du système, éventuellement exploitables, progressant vers le système final. Chaque version prend en compte les extensions planifiées pour cette version en bénéficiant du retour d'expérience des versions antérieures.

Le cycle de vie est dépendant du secteur d'activité, des spécificités du système à faire, des environnements du projet et des risques associés.

Le découpage en phases du cycle de développement est un choix de management adapté au type de produit à réaliser : le cycle de développement d'un avion est différent de celui d'une automobile ou d'une centrale nucléaire.

Le choix d'un cycle linéaire semble bien adapté à l'ingénierie d'un produit industriel dans un environnement relativement connu et maîtrisé, le choix d'un cycle en spirale à celle d'un système unique en environnement très évolutif ou de prototypes de produits fortement novateurs ou à risques élevés.

Remarque : On objectera que le cycle de vie correspond à une décomposition du projet en phases et qu'en toute logique, ce point devrait donc être traité dans la vision boîte blanche. Ce qui nous incite à le traiter dans l'aspect boîte noire, c'est que le cycle de vie du projet fait généralement partie de la vision externe sur le déroulement du projet :

- ☐ Le cycle de vie ou cycle de développement est généralement un choix managérial imposé au projet lors de son lancement.
- ☐ Un projet de conception de système met en jeu de multiples activités réalisées par de multiples acteurs. Son degré d'avancement est difficilement mesurable. Les fins de phase apparaissent comme des points de visibilité externe sur le projet : les objectifs de fin phase sont définis et leur obtention vérifiables. C'est donc aux jalons que le management d'une entreprise peut avoir une vision réaliste sur l'état des projets qu'il a mandatés, lui permettant de prendre des décisions sur leur avenir : passage à la phase suivante, retour sur la phase, réorientation ou abandon du projet.

3.2.2.2 Le Projet a besoin de systèmes contributeurs

Rappelons d'abord que le projet de développement :

- ☐ est, en tant que (ou appartenant au) système pour faire, un système contributeur du système à faire,
- ☐ définit les produits contributeurs au cycle de vie du système à faire,
- ☐ utilise certains de ces produits contributeurs. Un banc de test ou un outil d'assemblage peuvent être utilisés par le projet en phase d'intégration de prototype, par le système de fabrication pour la production de série, par le système de soutien pour la maintenance.

Le projet a besoin, à chaque phase de son cycle de vie, de ressources (compétences humaines, moyens méthodologiques et techniques) adaptées. Il a donc besoin de « **systèmes contributeurs** » chargés de préparer et lui fournir ces ressources adaptées. Ces systèmes contributeurs sont mis en place dans les entreprises pour développer et manager les ressources communes aux projets.

Par exemple, le système de développement et de maintien en condition opérationnelle d'une plateforme d'intégration de satellites, organisée en salle blanche et incluant les équipes compétentes et les systèmes de test et d'essai adaptés, en est un exemple pour une société faisant de l'ingénierie spatiale (la plateforme en tant que telle apparaît comme un système contributeur des satellites produits).

Ces systèmes contributeurs aux projets sont abordés dans les normes d'IS sous formes de processus de management des ressources de l'entreprise : management des compétences, management des infrastructures et moyens communs, management des processus et méthodes institutionnalisés dans l'entreprise... Ils font partie des processus dits « processus d'entreprise » voir partie 3, chapitre 12.2.4 et partie 4 chapitre 14.4.1.

Notons, pour mémoire :

- ☐ que les projets participent à l'amélioration et quelquefois au développement ou à l'acquisition des ressources communes,
- ☐ que les projets utilisent et améliorent leurs propres produits contributeurs : outils méthodologiques de planification et gestion de projet par exemple.

C'est à ces processus d'entreprise de capitaliser les apports des différents projets pour mieux contribuer aux projets futurs.

3.2.3 Le Projet est piloté

En principe, le projet est piloté à partir des objectifs qui lui ont été donnés lors du lancement. Le pilotage consiste à planifier le projet en fonction de ces objectifs, puis à maîtriser son déroulement selon le plan en réagissant aux écarts entre le réalisé et le planifié (voire en anticipant les réactions aux écarts potentiels par le management des risques).

A l'instar de ce que nous avons vu pour le pilotage des systèmes, le pilotage du projet peut se faire à différents niveaux d'invariance temporelle, allant du fonctionnement courant à ses évolutions majeures. Le découpage en phase présenté ci-dessus représentant le niveau le plus élevé de pilotage concernant les évolutions majeures.

En principe, le projet s'autopilote (c'est le rôle du chef de projet). Le problème du pilotage est alors logiquement à reporter à la vision boîte blanche.

Néanmoins, le projet a généralement une part de pilotage externe (qui est bien du domaine de la boîte noire).

Par exemple, l'entreprise garde un droit de regard sur tout projet qu'elle lance, le maître d'ouvrage garde un droit de regard sur le projet de réalisation du maître d'œuvre. Ce droit de regard est mis préférentiellement en œuvre lors des fins de phases du cycle de vie défini lors du lancement. En général, une vision objective sur l'état du projet est alors donnée par une revue de fin de phase (jalons) menée par une équipe indépendante du projet et de sa ou de ses hiérarchies : niveau d'atteinte effective des objectifs de la phase, niveau de risques sur les objectifs finals du projet. A partir du résultat de revue et de l'évolution de l'environnement, les décisions de niveau stratégique sur les suites à donner sont prises : reprise partielle de la phase, passage à la phase suivante avec modifications d'objectifs éventuelles, réorientation majeure du projet, abandon.

Notons que le pilotage externe, généralement tenu au courant de l'avancement du projet à travers des « reportings », peut s'exercer en dehors des jalons de fin de phase : modification d'environnement entraînant un changement majeur d'objectifs du projet, doute sur l'état du projet et lancement d'un audit...

3.2.4 Synthèse sur la vue externe du projet

➤ **Le projet est un système**, avec les caractéristiques globales suivantes :

- ☐ **Le projet répond à une finalité** : obtenir un produit répondant à un besoin
- ☐ Sur le plan **fonctionnel** (ce qu'il fait), **le projet est** vu comme **un processus** de transformation (de matière, d'énergie, d'information) qui permet de passer de l'expression de la finalité au produit.
- ☐ **Du point de vue organique** (ce qu'il est pour le faire), **le projet est** vu comme **un ensemble de ressources humaines et de moyens techniques** impliquant différents acteurs.

Nous l'analysons donc comme un système en tenant compte de ses caractéristiques de projet.

➤ **Le projet a une finalité**

La finalité du projet est d'obtenir, dans de bonnes conditions, un produit répondant à ses besoins. Cette finalité se décline en objectifs (ce qui doit être produit) et contraintes (par exemple de coût et délais). L'expression « dans de bonnes conditions » se traduit par une hiérarchisation des objectifs et contraintes et une recherche constante d'optimisation.

➤ **Le projet est inclus dans un environnement**

- ☐ C'est de son environnement qu'il tire les **ressources** et les **moyens** qui le constituent ou contribuent à sa réalisation (il y trouve ses propres **systèmes contributeurs**).
- ☐ Son environnement lui impose de multiples **contraintes**.

➤ **Le projet répond à un problème d'optimisation dans un ensemble d'objectifs et de contraintes**

Cette prise en compte des objectifs et contraintes se place dans le cadre d'une recherche d'**optimisation globale projet et système** tenant compte des évolutions (aléas du projet, évolutions d'objectifs ou d'environnement...) :

- ☐ Aux objectifs et contraintes initiales du projet viennent s'ajouter les objectifs et contraintes de toutes les parties prenantes qui interviennent en tant qu'acteurs dans le projet.
- ☐ Il y a lieu de rechercher un équilibre entre les objectifs et contraintes du projet, d'une part, les objectifs et contraintes des différents acteurs, d'autre part.

- ❑ Compte tenu des aléas internes et externes, tout projet comporte des risques qui doivent être identifiés, estimés et traités en diminution de risque. La recherche d'optimisation doit tenir compte des risques qu'elle engendre (coût de leurs parades et estimation des risques résiduels) dans une vision systémique incluant les risques système (risques fonctionnels ou techniques) et les risques projet (sur la tenue des objectifs et contraintes).

La réussite du projet implique une bonne coopération entre les acteurs en vue des objectifs du projet, alors que leurs objectifs particuliers sont, par nature, différents voire antagonistes.

➤ **Le projet a un cycle de vie**

Le processus-projet doit être managé dans le sens de cette optimisation selon un cycle générique de type {**planification** (ingénierie du système-projet)-**maîtrise du déroulement** selon le plan (exploitation du système-projet)}

La nécessaire progressivité du processus et les aléas et évolutions internes ou externes au projet conduisent à planifier globalement le projet en phases successives. C'est le cycle de vie projet qui correspond généralement à la vision temporelle que le projet présente à son environnement :

- ❑ le résultat d'une phase (généralement un stade de la définition du système) sert de référentiel pour la phase suivante,
- ❑ chaque phase fait l'objet d'une planification détaillée, d'une réalisation pilotée en conformité au plan, et, en sortie, d'une validation du résultat de la phase,
- ❑ les jalons de fins de phase sont les points de visibilité externes sur l'état du projet, ainsi que les points de pilotage externe programmé : décision de reprise de la phase, passage à la phase suivante, réorientation ou abandon.

3.3 Le Projet : Vue interne

Le projet est vu maintenant comme une boîte blanche. Il est alors logique de regarder :

- ❑ les aspects structurels : la décomposition structurelle et l'organisation (architecture) du projet,
- ❑ les aspects temporels : la décomposition en niveaux d'invariance temporelle et comportements du projets,
- ❑ les aspects de pilotage : le management du projet.

3.3.1 Aspects structurels internes

3.3.1.1 Problématique générale de décomposition d'un projet

L'approche boîte noire a montré que tout projet est un processus. En vision boîte blanche, celui-ci se décompose en activités enchaînées pour converger vers le résultat du processus, et se raffine en « tâches » à réaliser. Sous l'angle fonctionnel (ce qu'il fait ou doit faire), le projet apparaît ainsi comme un ensemble de tâches ordonnancées. Toute tâche est définie par ses entrées, dépendantes des résultats de tâches amont et ses résultats nécessaires aux tâches en aval.

Toute tâche doit être réalisée avec des compétences et moyens appropriés. Sur le plan organique (ce qu'il est), le projet est conçu comme un ensemble organisé et coopérant d'équipes (entités organisationnelles) disposant des compétences et moyens pour réaliser les tâches.

La planification de projet classique consiste donc à identifier et estimer les tâches pour répondre aux objectifs du projet, puis à définir l'organisation et les ressources aptes à les réaliser dans les contraintes (budget, délais) du projets. Ceci s'applique au projet de développement, mais avec des éléments de complexité supplémentaire dus à ce que le résultat est un système.

3.3.1.2 Problématique de décomposition d'un projet de développement de système

L'analyse boîte noire nous a déjà suggéré divers éléments de complexité du projet de développement d'un système

- ❑ Multiples produits à réaliser : constituants du système, produits contributeurs.
- ❑ Multiples activités techniques à réaliser pour chaque produit : chaque produit doit être spécifié, conçu, réalisé (intégré), vérifié..., et multiples activités de management et support aux activités techniques.
- ❑ Multiples acteurs participants à la réalisation : Maître d'ouvrage, maître d'œuvre, sous-traitants métiers, équipementiers, fournisseurs de matériels et de services, éditeurs de logiciel...

Remarque. A ces trois aspects de complexité qui vont servir de trame pour la décomposition fonctionnelle et organique du projet, s'ajoutent d'autres facteurs à prendre également en compte tels que les multiples cultures des acteurs internes et coopérants intervenant dans la réalisation : diversité de cultures techniques et de moyens matériels, différences de maturité dans la mise en œuvre des méthodologies d'ingénierie utilisées.

Comparé au projet classique qui s'intéresse essentiellement aux décompositions fonctionnelle en tâches et organique en entités organisationnelles, la vision IS apporte la vue complémentaire de la décomposition du système à faire et ses répercussions sur les vues fonctionnelles (logique des processus et décomposition en tâches) et organiques (logique d'organisation et décomposition en entités organisationnelles) du projet.

La maîtrise du projet de développement consiste alors à rendre cohérentes, entre elles et avec les objectifs et contraintes du projet (objectifs, contraintes de coût et délais, contraintes environnementales : acteurs prédéterminés ou potentiels, normes et cycle de vie imposés, moyens disponibles ou accessibles...), les trois logiques de décomposition qui en résultent (voir Figure 21) :

- ❑ logique du système (définie par l'arborescence des produits à réaliser),
- ❑ logique des processus (les activités à réaliser),
- ❑ logique d'organisation (organigramme industriel).

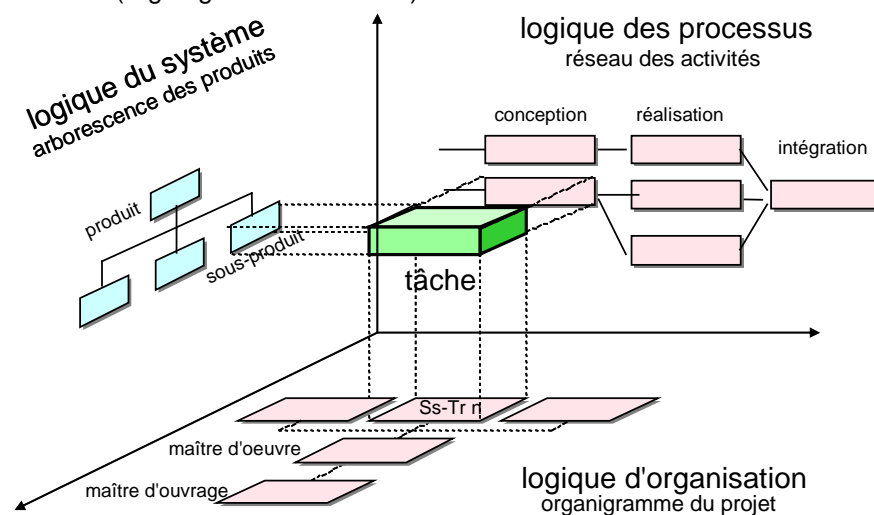


Figure 21 : La tâche au centre de trois décompositions

La décomposition structurelle peut être vue :

- ❑ sous l'angle fonctionnel (ce que fait le projet). La logique opératoire des processus et de leurs réseaux d'activité s'applique aux différents éléments de l'arborescence des produits du système. On en déduit les activités à réaliser qui se déclinent en tâches,
- ❑ sous l'angle organique (ce qu'est le projet). Le projet est structuré comme un ensemble d'entités organisationnelles en interaction auxquelles sont allouées les tâches du projet. Par principe de cohérence, une tâche est allouée à une responsabilité unique.

On note dès maintenant que la vue fonctionnelle combinant les deux logiques du système et des processus est à l'évidence du ressort de l'ingénierie technique qui, en conséquence, a pour rôle d'identifier les tâches, de les évaluer et de les ordonnancer avec l'aide des méthodes de l'IS, tandis que la vue organisationnelle est plus typiquement du ressort du management de projet qui a plus précisément pour rôle de planifier les tâches en les attribuant aux entités de l'organisation et en leur allouant les ressources et moyens nécessaires dans les contraintes de budget et de délais.

3.3.1.3 Le projet se décompose de manière itérative

3.3.1.3.1 Logique de la décomposition

La décomposition structurelle du projet est en relation avec la décomposition structurelle du système à faire :

- ❑ A haut niveau de granularité apparaît la notion de sous-projet :
la décomposition itérative du système en sous-systèmes induit naturellement une décomposition logique du projet en sous-projets : un sous-système comprenant les produits propres au sous-système et les produits contributeurs à son cycle de vie est un bon candidat pour devenir un sous-projet.
- ❑ L'aspect multi-acteurs implique une autre décomposition du projet : L'idéal serait qu'il y ait correspondance entre l'arborescence (architecture) système et arborescence (organisation) industrielle. Les sous-systèmes font alors l'objet de sous-projets, chacun étant alloué à une entité organisationnelle du projet (équipe, sous-traitant...) ; les interfaces techniques entre sous-systèmes génèrent les interfaces organisationnelles entre entités.

A défaut, on définit des responsabilités et des sous-traitances croisées, créant ainsi de la complication en multipliant les interfaces organisationnelles.

- ❑ Tout projet (sous-projet) se décompose en activités et plus finement en **tâches**. La tâche est le constituant fonctionnel élémentaire du projet.

Ainsi, sur le plan structurel, le projet apparaît, suivant le degré de granularité de l'observation, comme un ensemble de sous-projets ou, plus finement, comme un ensemble d'activités et tâches en interactions. Dans la vue fonctionnelle (ce que fait le projet), sous-projets, activités et tâches sont d'abord définis par leur produit/résultat attendu.

3.3.1.3.2 Concept de Tâche

Tout produit à développer dans le cadre du projet (le système à faire, un constituant du système à faire, un produit contributeur) implique le même type de processus technique : il faut des activités pour le spécifier, pour le concevoir, pour acquérir ou développer ses composants, pour l'intégrer, pour le vérifier.

Ceci conduit à une logique générique de **processus** enchaînant ces types d'**activités** applicables à tout produit à réaliser.

Par exemple le processus de conception comprend des activités de décomposition avec allocation d'exigences, de conception d'architectures, de comparaison d'architectures alternatives, de définition d'interfaces, de vérification d'architecture qui s'appliquent aussi bien au système qu'à ses sous-systèmes ou encore à leurs constituants ou leurs produits contributeurs ayant des caractéristiques de système.

Sur le plan formel, la décomposition en tâches consiste à appliquer la logique des processus d'ingénierie aux produits à développer.

Une tâche technique apparaît ainsi comme un ajustement de tout ou partie d'une activité d'un processus générique au besoin d'un produit de l'arborescence des produits du système. Une tâche est caractérisée par la spécification de son produit et de l'activité pour le réaliser, par ses entrées, par l'estimation des ressources et moyens nécessaires à sa réalisation, par sa place dans le réseau de tâche. Elle est attribuée à une responsabilité unique (les tâches attribuées à un même responsable peuvent être regroupées en lots de travaux permettant notamment de mettre en commun les aspects contractuels de sous-traitance).

A ces tâches techniques, contribuant directement à la finalité du projet, il faut ajouter les activités de management et les activités de support, comme la gestion de l'information, qui, pour une grande part, se perpétuent tout au long du projet.

Ces différents types de processus techniques, de management et de support ayant un caractère général, leur définition générique fait généralement l'objet de standardisation.

Les processus issus de normes sont adaptés aux spécificités de l'entreprise pour y être institutionnalisés. Ils servent alors de référentiel aux projets de l'entreprise et sont ajustés aux besoins et contraintes de chaque projet.

3.3.1.4 Composition et organisation du projet

Sur le plan organique, le projet est vu comme une organisation d'entités réalisant les tâches. Ces entités sont en interaction via **des interfaces organisationnelles**.

- ☐ Un sous-projet, aussi bien qu'une tâche, implique une responsabilité unique. La décomposition du projet en sous-projets et tâches induit une arborescence des responsabilités sur la structure industrielle multi-acteurs.
- ☐ L'aspect multi-métiers conduit généralement à des organisations matricielles croisant des responsabilités de projet, éventuellement regroupées par lignes de produits, et des responsabilités métier.
- ☐ Cet aspect multi-métiers est renforcé par la mise en œuvre de l'ingénierie simultanée consistant à concevoir simultanément le produit, son industrialisation, son système de production et son système de soutien, afin de gagner sur les délais de mise sur le marché.
- ☐ La cohérence technique interdisciplinaire est souvent assurée par l'équipe intégrée d'ingénierie (sous l'égide de l'autorité de conception, par exemple un architecte système).

3.3.2 Aspects temporels internes

Analysé comme un processus, tout projet apparaît comme un enchaînement d'activités conduisant progressivement au résultat. Ces activités se déclinent en tâches, et, à grain fin, le projet s'assimile temporellement à un réseau de tâches, séquentielles ou parallélisées, ordonnancées en fonction de leurs dépendances.

Analysé sur le plan organique comme un ensemble de ressources (compétences humaines, moyens techniques) en interaction pour effectuer les activités et tâches, le projet apparaît en constante évolution en fonction des besoins des activités et tâches : les ressources nécessaires aux activités et tâches sont soit mobilisées dans l'organisation du projet (qui est définie de manière relativement stable), soit trouvées dans son environnement via des sous-traitances.

3.3.2.1 L'approche temporelle du projet de développement d'un système : cycle de vie et processus

Nous avons déjà noté, dans l'aspect boîte noire, que le projet est jalonné par le cycle de développement choisi.

Ce dernier constitue donc un découpage temporel à gros grain, les jalons de fin de phase correspondant à des étapes logiques eu égard au type de système à réaliser (elles suivent en général une logique de type : spécification système, conception préliminaire, conception-développement des constituants, intégration du système. Voir Figure 20).

Nous avons vu, dans l'aspect boîte blanche, que le projet s'analysait *sur le plan opératoire* en processus qui se décomposaient en activités qui elles mêmes se déclinaient en tâches élémentaires.

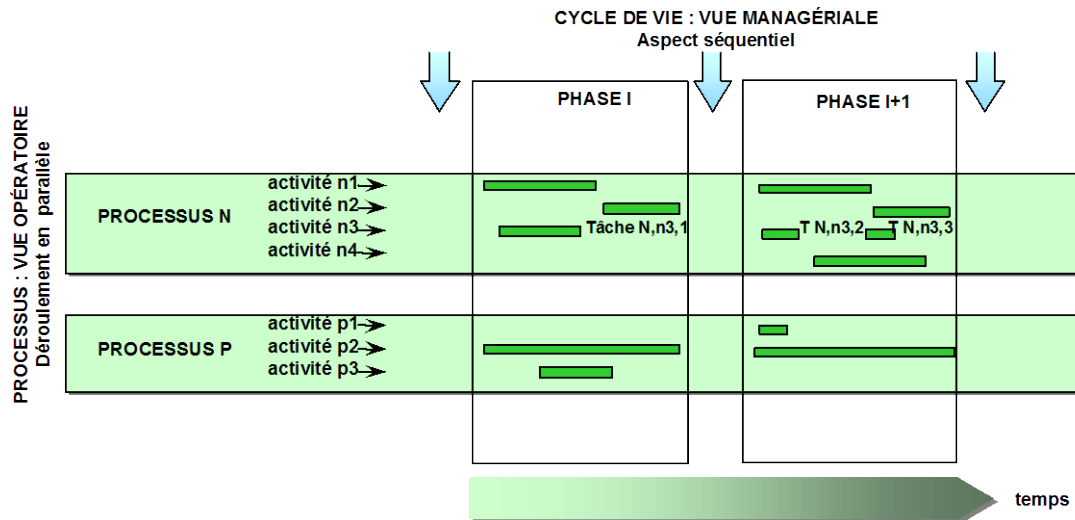


Figure 22 : Complémentarité entre cycle de vie et processus

La Figure 22 illustre cette double approche cycle de vie et processus.

- ❑ Le cycle de vie du projet offre une vision strictement séquentielle du projet. Chaque phase produit un référentiel pour les phases suivantes, et en principe on ne revient pas sur les activités ayant permis de le produire (sauf modification ultérieure d'objectifs du projet ou constat de défaut dans le référentiel produit).

La phase de spécification système fournit le référentiel des exigences systèmes nécessaire à la phase suivante de conception préliminaire.

La phase de conception préliminaire du système fournit l'architecture du système et donc le référentiel pour l'intégration du système ainsi que la spécification des composants et donc le référentiel des exigences pour les concevoir et les développer ou les acquérir.

En principe on ne retrouve plus d'activités de spécification et de conception dans les phases de réalisation ou d'intégration, sauf en cas de modification des référentiels d'entrée de ces phases ou de problème rencontré impliquant un retour en conception.

- ❑ Les processus et leurs activités offrent une vision orthogonale à la vision séquentielle de cycle de vie, car processus et activités se déroulent très largement en parallèle.

- Une phase comporte des activités de différents processus

La phase de conception préliminaire du système comporte à la fois des activités du processus de conception pour la conception architecturale du système et des activités du processus de spécification pour la spécification de ses constituants à développer ou à acquérir.

- Le même type d'activité peut concerner plusieurs phases

Les activités du processus de conception, qui se déroulent majoritairement dans les phases de conception préliminaire (architecture système) et de développement des constituants (conception détaillée,) peuvent également donner des tâches dans la phase d'analyse des besoins, par exemple pour concevoir des maquettes de validation d'exigence ou des prototypes de vérification de faisabilité d'exigences,

Certains processus couvrent tout le développement. C'est à l'évidence le cas des processus de management et de support, comme la gestion de l'information et de la documentation. C'est aussi le cas de certains processus techniques comme les processus de vérification et validation qui vérifient les conformités des résultats des tâches et des référentiels de fin de phase par rapport aux exigences d'entrées correspondantes, ou comme les processus d'optimisation préparant et justifiant les choix

- Certaines activités sont préparées très en amont

L'intégration dont les activités principales sont réalisées en phase d'intégration est préparée lors de la conception préliminaire qui définit l'architecture et les interfaces. Le processus d'intégration débute généralement en phase de conception préliminaire par des activités de définition de la démarche d'intégration et de spécification des produits contributeurs à l'intégration.

En quelque sorte le processus de maintenance dont les activités majeures se déroulent après mise en service du système commence dès la phase d'analyse des besoins pour l'expression des besoins et contraintes tels que : disponibilité du système, sûreté de fonctionnement, intégration de la maintenance du nouveau système dans le système de soutien existant.

3.3.2.2 Scénarios d'enchaînement de tâches et ordonnancement du réseau de tâches

Le croisement de cette double logique temporelle, phases de vie et processus (enchaînement d'activités), avec la double logique structurale, arborescence des produits du système et arborescence organisationnelle du projet, conduit à l'identification des tâches du projet.

Comme nous l'avons déjà approché dans la vision structurelle, une tâche :

- ☐ se place dans une phase de vie du projet,
- ☐ réalise (au moins pour les tâches techniques) tout ou partie d'une activité d'un processus pour un élément de l'arborescence produit du système,
- ☐ est attribuée à une responsabilité de l'arborescence organisationnelle du projet.

Une tâche dépend de tâches amont et conditionne des tâches en aval qui dépendent de ses résultats, créant ainsi des scénarios de fonctionnement du projet.

Par exemple la tâche de conception d'un constituant du système dépend des tâches ayant contribué à sa spécification et conditionne des tâches de conception/développement de ses sous-constituants, de conception/développement des produits contributeurs à son cycle de vie, d'intégration du constituant à partir de ses sous-constituants une fois développés. Ce même scénario peut se reproduire pour les sous-constituants.

On aboutit ainsi au réseau de tâches réalisant ces scénarios, ordonné en fonction des dépendances entre tâches.

3.3.2.3 Les transitions des scénarios d'enchaînement des tâches doivent être commandées

L'enchaînement des tâches pour atteindre les objectifs du projet doit être planifié, puis piloté en conformité au plan.

La planification s'apparente à un problème d'optimisation. Le réseau des tâches préalablement identifiées, estimées en délais et ressources nécessaires et ordonnées en fonction de leurs dépendances doit être optimisé. Le but de cette optimisation est de tenir au mieux les objectifs du projet dans ses contraintes budgétaires et temporelles. Vu sous l'angle temporel, l'optimisation se fait en fonction de l'ordonnancement (avec identification des chemins critiques à respecter et des marges permettant l'optimisation), des contraintes de ressources et moyens limités tant par les capacités de l'organisation industrielle et de ses moyens (deux tâches ne peuvent mobiliser simultanément les mêmes moyens) que par les contraintes budgétaires.

Cet ordonnancement et les optimisations liées au partage des ressources entre les tâches conduisent au planning du projet.

Au cours du déroulement, les tâches doivent être déclenchées et pilotées en conformité au plan. Cependant, comme nous l'avons vu, de multiples causes peuvent perturber le déroulement du projet

Toute modification d'objectif ou d'exigence, tout problème survenant dans le réseau de tâches peuvent impliquer des reprises de tâches amont entraînant des répercussions sur les tâches qui en dépendent. Ceci entraîne des perturbations en cascade avec des risques d'effets boule de neige et donc, en l'absence de réaction rapide, de perte de la maîtrise du projet.

En conséquence, tout au long du déroulement du projet :

- ❑ Les dérives doivent être contrôlées.

Les écarts entre réel et planifié doivent être détectés au plus tôt et faire l'objet d'un plan d'action spécifique en réduction/suppression de l'écart, afin de réagir en temps utile pour réussir à conserver la maîtrise de la conformité du produit ainsi que des coûts et délais du projet. Le suivi s'appuie notamment sur des indicateurs d'avancement des processus et des tâches.

- ❑ Les problèmes doivent être anticipés.

C'est le rôle de la maîtrise des risques. Elle consiste à les identifier, à les estimer et, en fonction de ces estimations, à préparer les parades opportunes, à les suivre (grâce à des indicateurs) et à déclencher les parades adéquates préventives ou curatives en temps utile.

- ❑ Les retours d'expérience doivent être capitalisés.

Les mesures de performances des projets et les problèmes rencontrés sont analysés afin d'améliorer les processus institutionnalisés dans l'entreprise, et de servir à l'estimation des futurs projets et de leurs risques.

3.3.3 Le Projet est piloté

Le projet se pilote à différents niveaux d'invariance temporelle.

Traditionnellement, le pilotage d'un projet s'effectue à trois niveaux (voir Figure 23 une représentation générique des deux premiers niveaux) :

- ❑ un pilotage stratégique qui en principe prend les décisions d'orientation en fin de phase du cycle de vie du projet en fonction de l'état du projet (généralement fourni par une revue de projet) et de l'évolution de l'environnement. Comme nous l'avons vu dans l'aspect boîte noire, le pilotage stratégique implique généralement le ou les commanditaires du projet,
- ❑ un pilotage opératif qui, en fonction des orientations du pilotage stratégique, planifie chaque phase en fonction des décisions stratégiques et conduit le projet en conformité au plan : lancement de tâches, suivi de réalisation, analyse des écarts, réaction pour maîtriser. C'est logiquement la responsabilité du chef de projet,
- ❑ une régulation interne à chaque tâche dont le déroulement est, par principe, planifié, suivi et maîtrisé par son responsable.

On trouve en partie 4, au chapitre 14.3.3 une présentation du management au niveau stratégique, et au chapitre 14.3.4, un modèle plus complexe associé au management des programmes.

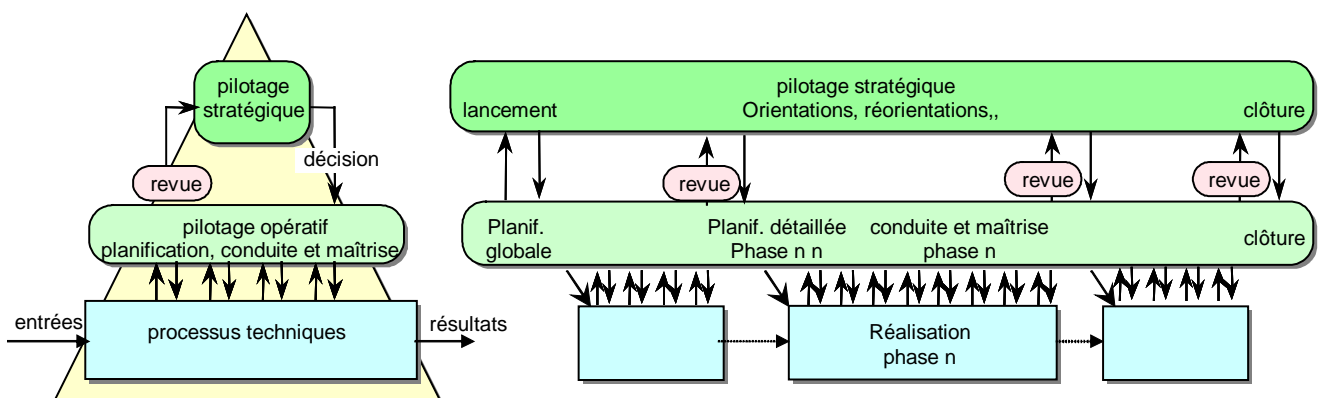


Figure 23 : Principe du pilotage d'un projet

Dans la pratique, le pilotage opératif fait l'objet de délégations sous la responsabilité du chef de projet, en fonction de la décomposition itérative du projet en sous-projets, conduisant ainsi à un système de pilotage hiérarchisé permettant d'en maîtriser le complexité à différents niveaux de granularité de tâches et d'invariance temporelle. A mesure que l'on descend dans la hiérarchie des sous-projets, les plannings sont de plus en plus détaillés, les contrôles d'avancement et les réactions de plus en plus fréquents.

Les commandes de transition correspondant au pilotage opératif, telles que lancement d'une tâche, mise en attente d'une tâche, reprise d'une tâche, changement d'objectif d'une tâche définissent la réaction du système-projet aux événements qu'il reçoit :

- ☐ Evènements internes : fin d'activité, résultat atteint, proposition de solution et demande de décision sur problème constaté (écart constaté par rapport au plan, choix techniques, dérogations ...),
- ☐ Evènements externes correspondant à des modifications dans l'environnement.

3.3.4 Synthèse sur la vue interne du projet

➤ ***Vu sous l'angle fonctionnel le projet est un processus.***

Il se décompose en (sous-)processus en interaction et in fine en **tâches**.

Les types de processus et d'activités d'ingénierie système s'avérant relativement invariants, la décomposition en processus fournit un cadre standard (normalisé ou institutionnalisé dans une entreprise) aux différents projets.

Ainsi, les tâches d'un projet sont des **ajustements** d'activité des processus applicables (le terme ajustement étant pris au sens du juste nécessaire) aux besoins propres du projet. En particulier les tâches techniques sont des ajustements d'activités techniques génériques appliquées à chaque élément de l'arborescence système (constituant ou produit contributeur).

➤ ***Vu sous l'angle organique, le projet est une organisation d'entités en interaction***

Ces entités, dotées de moyens techniques nécessaires, réalisent les activités et tâches (généralement regroupées en sous-projets ou en lots de travaux faisant l'objet de contractualisation).

Les éléments de cette organisation sont mobilisés, au fil des besoins de la vie du projet, dans l'environnement industriel existant qui impose ses propres contraintes.

L'organisation des grands projets est souvent définie sur la base de considérations politico-économiques, et non en regard des logiques d'arborescence système et processus. Cette situation crée alors artificiellement des interfaces techniques et organisationnelles qui compliquent le projet et risquent de limiter les opportunités d'optimisation globale sur l'ensemble constitué du système à faire et du projet pour le développer.

➤ ***Le projet est planifié***

Cette **planification du projet** apparaît comme un problème d'optimisation entre :

- ☐ la logique de décomposition système,
- ☐ la logique des processus,
- ☐ et l'organisation industrielle qui impose ses limitations (ressources, moyens) et sa propre logique.

C'est dans ce contexte d'optimisation que les tâches sont identifiées, estimées (en termes de ressources et moyens), ordonnancées puis planifiées.

La planification avec les entités concernées est une condition déterminante pour s'assurer de la disponibilité de l'ensemble des moyens humains et matériels au moment nécessaire à la réalisation de la tâche projetée. Ce qui signifie que tout « glissement » de la planification constaté en amont de la réalisation d'une tâche du projet doit faire l'objet d'une information sur l'impact de la planification des tâches des acteurs placés en aval.

➤ Le projet est conduit en conformité au plan

La *conduite de projet* continue cette optimisation au fil des aléas de la vie du projet, ceci à plusieurs niveaux de pilotage. Traditionnellement :

- ☐ un pilotage stratégique, qui analyse le projet et ses risques aux principaux jalons du cycle de vie du projet, donne les orientations pour sa poursuite,
- ☐ un pilotage opératif qui entre deux jalons planifie les activités et tâches et les pilote en mesurant leurs performances et en réagissant aux écarts réel/planifié (ce niveau pouvant faire l'objet de délégations à une hiérarchie de responsabilités),
- ☐ une régulation interne à chaque tâche élémentaire.

Du fait des répercussions de tout problème ou écart constaté sur les tâches en aval (voire impliquant la reprise de tâches en amont), le projet apparaît comme un système très sensible aux petites perturbations : le pilotage opératif doit être très réactif, et si possible anticipatif grâce au management des risques.

3.4 Ingénierie système et Projet de développement

3.4.1 L'ingénierie système est une aide pour faire l'ingénierie du projet

Le projet étant un système, il est suggéré que les concepts et démarches d'ingénierie système soient applicables au projet, sous réserve de certaines adaptations :

- ☐ La **planification du projet** consiste à « faire l'ingénierie de conception » du système-projet.
Définir les exigences du projet, à savoir ses objectifs et contraintes (le pourquoi ?), le décomposer fonctionnellement en tâches à accomplir en allouant les objectifs (le quoi ? ce que doit faire le projet), définir les démarches de réalisation des tâches (le comment ?), estimer les ressources nécessaires aux tâches en tenant compte des contraintes (avec quoi ?), ordonnancer et planifier les tâches (quand ?), définir ou préciser l'organisation industrielle (ce qu'est le projet) et allouer les tâches (avec qui ?)
- ☐ La **réalisation du projet** consiste à « exploiter » le système-projet ainsi défini.
Piloter et réaliser les tâches techniques selon la planification. Manager ces réalisations : suivre, réagir aux écarts entre réel et planifié, ceci s'appliquant aux domaines du management de projet : le contenu, l'avancement, les coûts, les délais, les ressources humaines, les moyens, l'information, la communication, les risques, la qualité, les sous-traitances...

3.4.2 Management de l'IS et management de projet

Le **management de l'IS** consiste à **planifier** et **conduire** la réalisation des démarches d'IS dans le cadre du projet.

Son rôle consiste à ajuster les processus et activités, démarches, méthodes et outils de l'ingénierie système (éléments génériques, plus ou moins standardisés/normalisés) aux besoins et contraintes propres du projet, et les mettre en œuvre dans le contexte du projet.

Par exemple, il est du ressort des activités d'ingénierie d'évaluer les solutions alternatives en analysant leurs impacts sur le système et sur le projet ainsi que les risques associés, et de fournir ainsi les aides à la décision. C'est au management de l'IS dans le projet de définir et piloter et contrôler techniquement ces activités. Il revient au management du projet de gérer ces activités et de prendre les décisions.

Management de l'IS et management de projet sont ainsi complémentaires et indissociables :

- ☐ c'est l'IS qui permet de définir, effectuer et contrôler techniquement les activités techniques à réaliser,
- ☐ c'est le management de projet qui distribue les travaux correspondant aux entités du projet, alloue et gère les ressources, prend les décisions.

Le management du projet supporté par une organisation complexe et répartie, en charge de l'Ingénierie d'un système lui aussi complexe, génère et doit partager une quantité considérable d'informations entre une grande quantité d'entités organisationnelles et d'acteurs. La maîtrise de configuration des données projets et des données techniques de l'ingénierie justifie la mise en œuvre d'un plan de management de l'information et d'un plan de gestion des configurations projet et produits, avec toute la difficulté d'assurer le partage et la circulation descendante et remontante des données utiles à chaque acteur.

Remarque : Notons que le management de l'IS se place également au niveau de l'entreprise. Il s'agit de manager ce qui est commun aux différents projets mettant en œuvre l'IS, de créer l'environnement favorable à la réussite de ces projets (investissements, méthodes et outil, management des ressources humaines et des connaissances, institutionnalisation et amélioration des processus...) et de déployer la mise en œuvre de cet environnement dans l'entreprise.

PARTIE 2 : LE SYSTEME REpond A UNE FINALITE

Guide de lecture de la partie 2

La partie 1 a permis la découverte des fondamentaux de l'IS, à commencer par le fait qu'un système répond à une finalité. Cette finalité est généralement formulée à grands traits par l'autorité qui décide de lancer l'étude d'un système pour y répondre.

Cette partie 2 va s'attacher à poser le problème à résoudre. Il s'agit de transformer la finalité en spécification (dite fonctionnelle) prescrivant ce que doit faire le système, avec quels niveaux d'exigences il doit le faire et quelles contraintes il doit respecter pour satisfaire au mieux à l'ensemble des besoins et contraintes des « parties prenantes » concernées. .

Elle s'arrête ainsi, en principe, à la formulation précise du « Pour quoi ? », ce à quoi doit répondre le système, laissant pour la partie 3, consacrée au système réalisé, le « Quoi ? », ce qu'est le système solution au problème ainsi posé, comment il est agencé.

Reste que le « Pourquoi ? » n'est pas indépendant du « Quoi ? », il s'agit de trouver le meilleur compromis entre ce qu'on voudrait et ce qui est possible. La Figure 24 en expose la problématique dans le contexte traditionnellement adopté en France où :

- ❑ les parties prenantes côté utilisation sont représentées par un maître d'ouvrage responsable de la formalisation du besoin et de l'acquisition d'une solution répondant à ce besoin afin de mettre cette solution à disposition des utilisateurs,
- ❑ les parties prenantes réalisatrices sont représentées par un maître d'œuvre responsable de la réalisation de la solution.

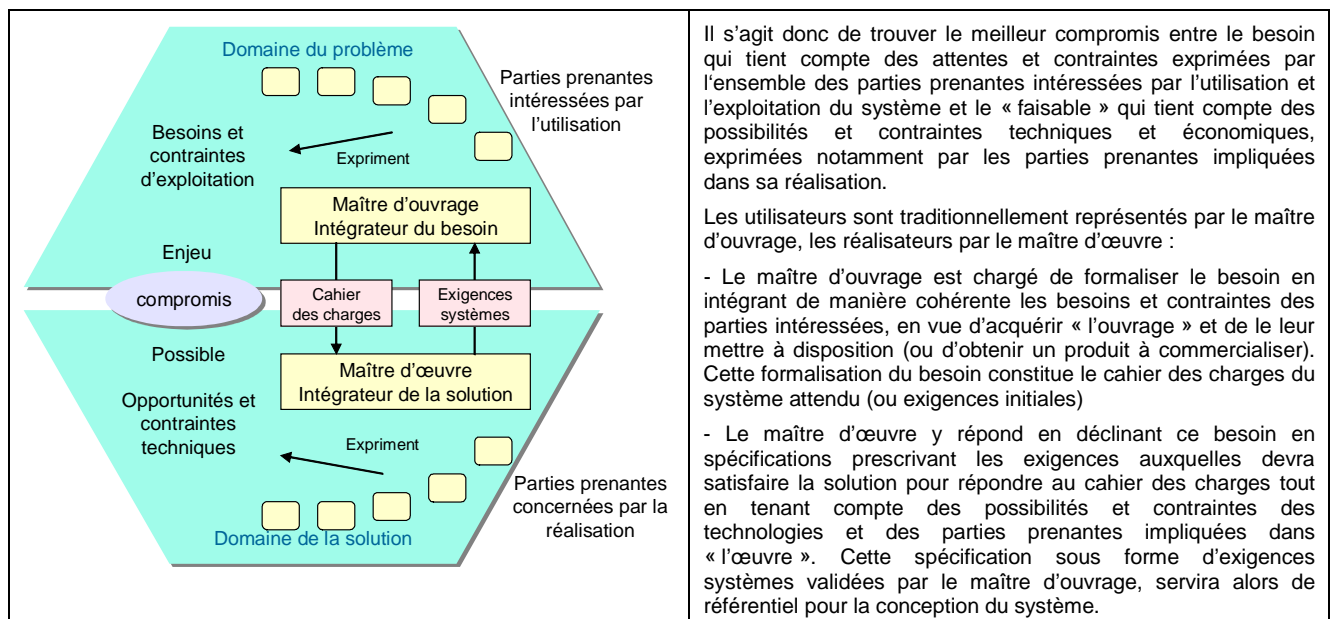
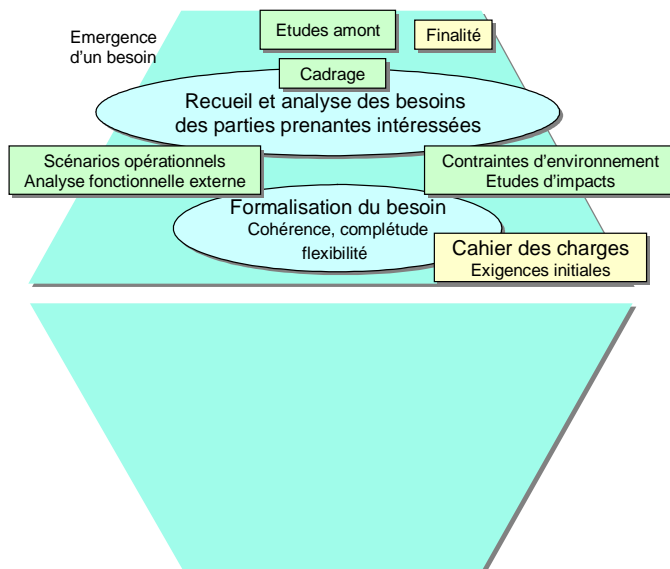


Figure 24 : Un compromis entre besoins et contraintes de toutes les parties prenantes

Après avoir identifié les différentes parties prenantes et les sources de besoins et contraintes les concernant, cette partie est constituée de deux chapitres consacrés respectivement à (voir Figure 25) :

- ❑ *L'analyse et la formulation du besoin.* Le besoin est défini en analysant les attentes et contraintes des parties prenantes intéressées par l'utilisation et l'exploitation du système. Le résultat est consigné dans le cahier des charges (généralement formalisé sous forme d'exigences dites initiales).
- ❑ *L'ingénierie des exigences.* Elle débute par la spécification du système. Elle prend la forme d'un référentiel d'exigences auxquelles doit satisfaire le système à faire pour répondre aux besoins exprimés dans le

cahier des charges tout en tenant compte des contraintes des parties prenantes impliquées dans la réalisation et la maintenance du système. Ce référentiel d'exigences dites exigences système prescrit ainsi le problème à résoudre par les concepteurs du système.



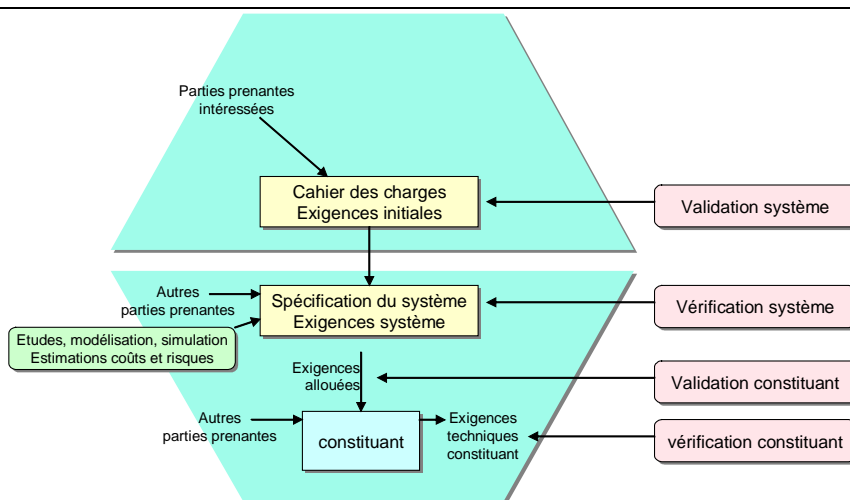
1 - Analyse et formulation du besoin

A partir de l'identification d'un besoin, des études (dites études amont) de faisabilité et d'opportunité conduisent à la décision d'y répondre par la réalisation d'un système. Elles permettent d'en préciser la finalité et fournissent un premier cadrage.

Les caractéristiques définissant les besoins et contraintes sont recueillies auprès de représentants des diverses parties prenantes intéressées par l'utilisation ou l'exploitation du futur système. Elles sont analysées en termes de cohérence, de complétude, d'utilité ou de priorité et, le cas échéant, font l'objet de recadrages.

Cette analyse est confirmée par les études portant sur les relations entre système et environnement : services attendus du système et scénarios opérationnels (analyse opérationnelle et fonctionnelle externe); relations avec les autres systèmes; caractéristiques des utilisateurs; contraintes d'environnement du système (études d'impacts).

L'ensemble est formalisé sous forme d'un cahier des charges définissant, de manière cohérente et complète, ce qui est attendu de la solution pour répondre au besoin, en attribuant éventuellement des flexibilités ou des priorités entre exigences. Le cahier des charges représente les « exigences initiales ».



2 - Ingénierie des exigences

La spécification du système à faire consiste à formaliser le problème à résoudre sous forme d'un référentiel des exigences dites « exigences système ». Elle part du cahier des charges fournissant les exigences initiales et les complète à travers l'analyse des potentialités, attentes et contraintes des parties prenantes réalisatrices. Elle s'appuie sur des modélisations, des simulations, des essais sur des prototypes de faisabilité, des estimations des coûts et des risques. L'objectif est de cerner la faisabilité du système, en regard des exigences et en prenant en compte les contraintes technologiques, économiques et temporelles assignées au projet.

Les exigences sont formulées de telle sorte qu'elles fournissent aux concepteurs un référentiel précis, complet, cohérent, faisable et vérifiable.

Les exigences système sont allouées (réparties) au cours de la conception sur les constituants et les produits contributeurs, définissant ainsi des référentiels de plus en plus détaillés de spécification des éléments du système à faire. Cette partie montre ainsi le rôle fondamental de « l'ingénierie des exigences » pour garantir que le système réalisé réponde bien aux exigences initiales et spécifiées. A ce titre, sont introduits :

- le concept de traçabilité, qui permet de justifier les liens de cohérence et complétude entre les exigences initiales, les exigences système et les spécifications des constituants du système, ainsi que d'identifier les impacts de toute modification d'exigence sur les éléments du système, ou à l'inverse de toute modification d'un élément sur la tenue des exigences système.
- les concepts de vérification et validation, qui consistent à s'assurer de la conformité d'un produit respectivement à son référentiel de conception (il est réalisé sans erreur) et son référentiel d'exigences (il répond aux besoins et contraintes).

Figure 25 : De l'émergence du besoin à l'ingénierie des exigences

Les exigences système se déclinent au cours de la conception en exigences de conception, de réalisation, de vérification, d'exploitation et de maintenance applicables au système, à ses constituants et à ses produits contributeurs. L'ingénierie des exigences est à la base des activités de vérification et de validation (V & V), qui permettent de s'assurer que le système est bien fait et satisfait aux besoins et contraintes des parties prenantes.

Les exigences doivent elles-mêmes être vérifiées et validées.

4 PREALABLE : PRESENTATION DES CONCEPTS

4.1 Du besoin à satisfaire au problème à résoudre

Cette partie 2 aborde le système sous l'angle de la satisfaction d'un **besoin** et, en conséquence, de la position du **problème** auquel le système doit apporter une solution (ce à quoi doit satisfaire la solution).

Elle traite donc des activités qui font passer de l'émergence d'un besoin à la formalisation du problème à résoudre pour satisfaire au besoin.

Cette formalisation est exprimée en termes d'**exigences** auxquelles devra satisfaire le système. Elle nécessite d'avoir préalablement précisé la finalité du système à faire et exploré les besoins et contraintes de ses utilisateurs et exploitants.

La partie 3 abordera la solution au problème ainsi posé, sous forme du « système réalisé ». Elle traitera donc de la problématique de la conception et de la réalisation de cette solution de manière à ce que cette solution réponde de manière optimale au problème en tenant compte des possibilités (technologiques, industrielles, économiques...).

Nous faisons donc une différence entre « besoin » et « problème » :

- ☐ Le « besoin » au sens courant concerne les attentes et contraintes des parties prenantes coté utilisation : acquéreurs, utilisateurs, exploitants et usagers du système.
- ☐ Le « problème » est la transcription du besoin en exigences pour le système à faire : il provient de ce que l'on recherche une bonne solution (solution optimisée), compromis entre le souhaité (le besoin) et le possible (limité par les contraintes technologiques, économiques, sociales...). Le problème doit donc prendre en compte, outre les besoins et contraintes des parties prenantes utilisatrices et exploitantes, ceux des parties prenantes impliquées dans la conception et la réalisation de la solution.

Remarque : Dans le principe, l'expression du besoin ne préjuge pas des choix de solution. Elle définit les services attendus du système à faire avec les capacités requises ou souhaitées, non comment il doit être fait.

La position du problème suit le même principe : il s'agit toujours de spécifier ce que doit faire le système et les niveaux de service associés, non comment il sera fait. Toutefois, cette spécification va mieux prendre en compte les potentialités techniques et économiques et s'affiner sur la base des choix technologiques majeurs.

La maîtrise des exigences est une des clés de la réussite en ingénierie de systèmes :

- ☐ Le besoin puis le problème sont formalisés sous forme d'**exigences** traduisant et précisant les attentes et contraintes des **parties prenantes** concernées :
 - les parties prenantes utilisatrices pour le besoin formulé en **exigences initiales**,
 - et aussi les parties prenantes réalisatrices (ou au moins le maître d'œuvre qui les représente) pour le problème formulé en **exigences système** (ou exigences techniques système).
- ☐ La conception, traitée en partie 3, consistera à définir l'architecture du système et à allouer à chaque constituant ses exigences de réalisation, d'intégration dont de vérification et validation, de maintenance et de retrait.
- ☐ Lors de l'intégration du système, on vérifie que les constituants, puis que le système, ont été bien réalisés et répondent aux besoins en s'assurant qu'il sont conformes à leurs exigences.

Ainsi l'ingénierie des exigences permet de suivre les transitions et les liens de cohérence et complétude entre les **exigences initiales (le besoin)**, les **exigences (techniques) système**, puis les **exigences spécifiées** (définition de la solution), et enfin la solution réalisée (dont on s'assure de la conformité aux exigences).

Ce concept s'applique au système et, de manière itérative, jusqu'à ses constituants élémentaires. Tout élément du système (système, sous-système, constituant) aura donc :

- ☐ ses exigences allouées traduisant les besoins et contraintes issus de l'élément de rang supérieur,
- ☐ ses exigences techniques traduisant le problème à résoudre par son concepteur,
- ☐ ses exigences spécifiées définissant la solution, dont les exigences allouées à ses sous-constituants ou celles induites par ces derniers.

Ainsi, ce même élément est considéré comme une partie de solution au niveau de l'élément de rang supérieur, un problème au niveau élément et un porteur d'exigences (besoin) pour l'élément de rang inférieur.

On perçoit déjà que cette approche d'ingénierie des exigences qui accompagne et formalise toute la démarche technique faisant passer du besoin à la solution a également le double avantage

- ☐ De donner une vision globale et commune de l'ensemble du problème, permettant le partage des processus d'IS par l'ensemble des acteurs.
- ☐ De clarifier la répartition des responsabilités lors des allocations des tâches aux acteurs tout au long du développement.

4.2 Les parties prenantes

Ce sont toutes les personnes (physiques ou morales) concernées, directement ou indirectement, par le système. L'enjeu est de réaliser un système répondant aux attentes et contraintes des parties prenantes les plus directement concernées (en général les acteurs du système) et acceptable par tous.

4.2.1 Typologie des parties prenantes

Parmi les parties prenantes, on distingue généralement :

- ☐ les parties prenantes coté acquéreur, dites « **intéressées** (par l'utilisation) », qui sont celles concernées, de près ou de loin, par l'utilisation et l'exploitation du produit :
 - organisme acquéreur, utilisateur et/ou exploitant,
 - utilisateurs directs ou indirects du système et donc de ses services, pouvant être dans certains secteurs représentés par le marketing et/ou des associations de consommateurs,
 - opérateurs et exploitants-maintenanciers impliqués dans la mise en oeuvre du système,
- ☐ les parties prenantes coté fournisseur, que nous qualifions ici « **d'impliquées** (dans la réalisation) », chargées du développement du produit, de sa production et de sa maintenance constructeur : concepteur, développeurs, sous-traitants, équipementiers, producteurs, maintenanciers industriels, ...
- ☐ les autres parties prenantes « **potentiellement concernées** », susceptibles d'être concernées, plus ou moins directement ou à plus ou moins long terme, par les impacts du système. La prise en compte de ces parties prenantes passe généralement par l'application de normes et de règlements ainsi que des résultats des études d'impacts. Ces parties prenantes sont quelquefois directement représentées par exemple par des associations de défense, des groupes de pression, des ONG (écologie)...

Remarque : selon l'usage, compte tenu de la multiplicité des parties prenantes, l'ensemble des parties intéressées par l'utilisation et l'exploitation du système ou concernées par son impact sur l'environnement a un représentant unique : le maître d'ouvrage. De son côté le maître d'œuvre représente l'ensemble des autres parties prenantes impliquées directement ou indirectement dans la conception, le développement et la production et la maintenance du système.

4.2.2 Parties prenantes, besoins, contraintes et exigences

La Figure 26 illustre les principaux types d'attentes et contraintes à prendre en compte, pour les différents types de parties prenantes. Ces besoins et contraintes sont à l'origine des exigences auxquelles devra satisfaire le système.

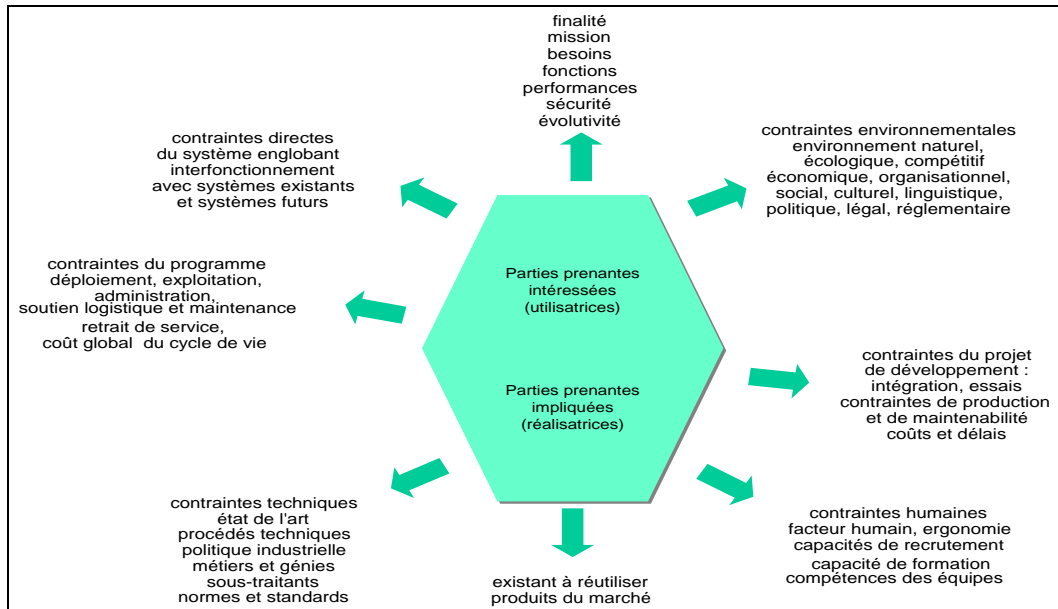


Figure 26 : Sources des attentes et contraintes des parties prenantes

Cette figure appelle quelques remarques :

- ❑ La figure semble faire une distinction entre les besoins et contraintes émanant des parties prenantes intéressées par l'utilisation et ceux émanant des parties prenantes impliquées dans la réalisation. Si cette distinction est évidente pour la définition de la finalité et des missions, ou à l'inverse pour des contraintes technologiques de détail, elle est généralement beaucoup moins tranchée. En voici des exemples :
 - On ne peut exprimer de besoins d'utilisation sans avoir une certaine idée de leur faisabilité technique, et dans certains cas, de nombreuses contraintes techniques peuvent être à juste titre imposées par l'utilisateur-exploitant : contraintes de compatibilité, contraintes de méthodes et d'outils (on ne peut changer continuellement de méthodes excepté si cela présente un intérêt : simplification, coût inférieur, formation simplifiée, ...)
 - Les contraintes sociales, linguistiques, culturelles, politiques, légales de l'environnement d'utilisation peuvent émaner aussi bien de l'utilisateur (par exemple pour un système unique), que du réalisateur (par exemple pour un système à commercialiser sur le plan international). Les capacités de recrutement et formation peuvent concerner aussi bien l'exploitant coté utilisation que le mainteneur coté industriel.
- ❑ Des besoins et contraintes ne peuvent être définis dans le détail dès le départ : ils se raffinent en fonction des choix successifs tandis que ces choix peuvent entraîner de nouveaux besoins et contraintes.
- ❑ les exigences qui découlent des besoins et contraintes doivent d'une manière ou d'une autre représenter un compromis acceptable par toutes les parties prenantes.
 - La plupart des choix importants impliquent différentes parties prenantes. A titre d'exemple, les procédures d'exploitation et de maintenance (dont procédures d'installation, de ravitaillement, de reconfiguration, de passage en modes dégradés, de gestion des obsolescences) sont dérivés des besoins et contraintes de fonctionnalité, fiabilité, disponibilité initialement exprimées par les parties intéressées par l'utilisation et l'exploitation, mais sont également induites par les contraintes technologiques de conception et réalisation (fiabilité intrinsèque des constituants, choix

- d'architecture, méthodes de fabrication). Elles ont des impacts tant sur l'exploitant que le mainteneur (que ce dernier soit coté exploitant, coté constructeur ou tierce partie).
- Des attentes et contraintes de différentes parties prenantes sont souvent antagonistes : au-delà des antagonismes techniques ou entre technique et coûts, toutes les parties attendent un profit économique à l'évidence limité par les attentes de autres.
 - Certaines attentes des différentes parties prenantes ne sont pas directement exprimées. Il n'y a pas que les attentes techniques et économiques. Les recherches d'image (effet vitrine), d'avance technologique, d'accroissement de compétence sont souvent des attentes bien réelles qui influencent les choix, même si elles ne sont pas toujours explicitées en exigences.

On en déduit que toutes les parties prenantes sont impliquées et doivent coopérer. Les parties prenantes impliquées dans la réalisation doivent à l'évidence prendre en compte les besoins et contraintes exprimés. Les parties prenantes intéressées par l'utilisation et l'exploitation sont impliquées par les conséquences des choix tout au long du projet. C'est le rôle de l'ingénierie système d'intégrer cette vue globale et partagée et de faire en sorte que l'on converge vers une solution optimisée.

4.3 Cadrage du besoin et du problème

Les besoins et contraintes synthétisés sur la figure précédente n'apparaissent que progressivement au cours de l'expression des besoins et contraintes ainsi que de la définition du problème (voir parfois de la conception de la solution). La vision sur le système passe ainsi par différents niveaux d'abstraction depuis l'expression de la finalité jusqu'à sa spécification.

A titre d'exemple, le tableau suivant indique les niveaux d'abstraction, concernant le cadrage du besoin et du problème, traditionnellement utilisés en ingénierie des systèmes d'information :

Niveau d'abstraction	Détermine le	Correspondance en termes de formalisation (système d'information)
Stratégique	<i>Pourquoi ?</i>	Formalisation des objectifs et leurs priorités en conformité à la vision politique
Fonctionnel	<i>Comment ?</i>	Déclinaison pragmatique des besoins et contraintes sous la forme d'exigences initiales (fonctionnalités, hiérarchisation et dépendances)
Technologique	<i>avec quoi ?</i>	Identification des technologies (nouvelles ou classiques) applicables à la solution
Organisationnel	<i>qui fait ?</i>	Formalisation des exigences organisationnelles (environnement d'exploitation et de maintenance, projet de développement) et accompagnement du changement
Contraintes de réalisation	<i>quand et combien ?</i>	Formalisation des exigences économiques et temporelles, de visibilité et de contrôle sur le projet

Figure 27 : Niveaux d'abstraction pour le cadrage du besoin et du problème

S'ils correspondent à une certaine logique d'enchaînement - finalité avant besoin, besoin avant solution (technologie, organisation, projet) - ces niveaux d'abstraction ne font pas obligatoirement l'objet d'une prise en considération séquentielle :

A toute étape de conceptualisation ou de formalisation du besoin ou du problème on doit les **cadrer** en y associant l'ensemble des types de contraintes (tout en les appréhendant avec le niveau d'abstraction adéquat). Tout objectif ou exigence initiale doit pouvoir être justifié par rapport à la finalité et aux contraintes du cycle de vie :

On ne valide pas d'objectifs et on ne fige pas d'exigence sans se poser des questions telles que : est-ce conforme à la finalité ? Est-ce faisable avec les technologies disponibles à horizon considérée ? Est-ce

compatible avec les contraintes législatives et réglementaires ? Est-ce réalisable dans le cadre budgétaire envisagé ?...

En conclusion, pour définir le besoin et le problème à résoudre par la conception, il y a lieu :

- ☐ d'identifier les parties prenantes, et de choisir et valider les personnes (ou collectivités) aptes à les représenter,
- ☐ d'explorer le problème en facilitant et structurant l'expression des besoins et contraintes des différentes parties prenantes et en les caractérisant : c'est l'objet de l'analyse des besoins des parties prenantes (exigences des parties prenantes)
- ☐ de décliner ces besoins et contraintes en un ensemble cohérent et complet d'exigences que le système devra satisfaire (exigences systèmes).

Dans la pratique on est généralement conduit à faire l'opération en deux temps, en séparant

- ☐ ce qui définit le « pur » besoin, à savoir les besoins et contraintes exprimées par les parties prenantes utilisatrices et exploitante formalisées dans le cahier des charges (exigences initiales),
- ☐ ce qui définit le problème à résoudre par la conception, prenant également en compte les contraintes exprimées par les parties prenantes réalisatrices, formalisé par les exigences système (ainsi passées au crible du réalisme : faisabilité technique et économique, vérifiabilité...).

5 LE BESOIN OPERATIONNEL

On décide de réaliser un système pour répondre à une finalité.

La **finalité** est généralement formalisée par l'autorité qui décide de financer la réalisation du système.

A partir de cette finalité

- ☐ on déduit les missions que le système devra remplir ou les services qu'il devra fournir aux parties prenantes intéressées (utilisatrices et exploitantes),
- ☐ on exprime, avec ces parties prenantes, les **besoins** et **contraintes** qu'il devra satisfaire pour remplir ces missions ou fournir ces services.

5.1 L'approche du besoin

On distingue, dans la définition du besoin, ce terme étant pris au sens large,

- ☐ les **attentes et besoins fonctionnels**. Ils déterminent ce que le système doit faire, avec quels niveaux de service et sous quelles conditions,
- ☐ les **contraintes** généralement dues à l'environnement imposées au système que ce soit en mission ou hors mission. Elles influencent ce que le système doit être, en lui imposant des caractéristiques complémentaires aux services attendus.

Remarque : Les besoins sont directement liés à la finalité (raison d'être du système) et aux services que doit rendre le système vis-à-vis de certains éléments de son environnement. Tandis que les contraintes d'environnement expriment des exigences d'adaptation à l'ensemble de l'environnement du système.

5.1.1 Les besoins fonctionnels

Il s'agit ici de ce qui est attendu du système pour répondre à sa finalité. On distingue les missions opérationnelles, directement liées à la réalisation de la finalité et les missions logistiques nécessaires à la réalisation des missions opérationnelles.

Remarque : nous utilisons ici une terminologie (mission, concepts d'opération) empruntée à des secteurs tels que défense, spatial, aéronautique, santé, humanitaire...

5.1.1.1 Missions, concepts d'opération, scénarios opérationnels

Dans ce contexte terminologique, la finalité se décompose au premier niveau en **missions** (missions opérationnelles) que le système doit être apte à accomplir dans ses différents contextes d'emploi. A ce niveau d'analyse, les missions sont décrites par les types d'opérations que le système doit pouvoir réaliser.

Ainsi définit-on généralement, pour chaque mission, les **concepts d'opération** décrivant de façon macroscopique la manière dont le système doit opérer vis à vis de son environnement : ce qu'il doit faire, et pourquoi il doit le faire. On y associe les objectifs clé et capacités à atteindre, ainsi que leur raison d'être.

On s'appuie pour définir les concepts d'opération sur des **scénarios opérationnels** modélisant les emplois possibles ou les réactions attendues du système face à des hypothèses de scénarios mettant en scène des éléments de son environnement.

5.1.1.2 Services rendus et scénarios de comportement

De manière plus fine, le système doit rendre à son environnement des services pour remplir ses missions. Une mission s'analyse sous forme d'un enchaînement de services fournis à l'environnement d'utilisation.

Les services sont rendus par des **fonctions** du système (**fonctions de service** appelées à devenir **fonctions opérationnelles** une fois mises en œuvre par le système réalisé) transformant des entrées du système en sorties. La recherche des fonctions de service est souvent appelée analyse fonctionnelle externe.

Les **scénarios de comportement externe** ou **scénarios d'échanges** du système décrivent les échanges (matière, énergie, information) entre le système et les éléments de l'environnement lors des enchaînements de services.

5.1.1.3 Scénarios et fonctions logistiques

Pour garantir son aptitude à réaliser ses missions et fonctions opérationnelles, le système doit être maintenu en condition opérationnelle : il a besoin de déploiement, de ravitaillement, de maintenance, de réparation... A ce titre, il accomplit des scénarios logistiques mettant en œuvre des fonctions logistiques échangeant des services avec son environnement de soutien (généralement à analyser dans différentes hypothèses de soutien).

Exemples : testabilité en opération, ravitaillement en vol ou à la mer, évolution de la qualité de service d'un satellite de télécommunication par téléchargement de nouveaux programmes...

5.1.2 Les contraintes de l'environnement

Outre la satisfaction des besoins opérationnels, le système est soumis à des **contraintes** diverses exprimées par les parties prenantes utilisatrices et exploitantes et/ou découlant de l'environnement (pris au sens le plus large). Elles expriment des propriétés que devra respecter la solution et, de ce fait, peuvent restreindre les choix techniques.

En voici des exemples :

- ☐ Contraintes d'environnement physiques : tenue aux ambiances agressives, par exemple résistance aux agressions physiques (chocs, vibrations, température, hygrométrie, radiations), chimiques, biologiques,...
- ☐ Contrainte de sécurité : innocuité du système vis à vis de son environnement, immunité du système par rapport aux agressions accidentelles ou intentionnelles de son environnement.
- ☐ Contraintes liées aux usagers et à l'environnement social, dont impacts sur les organisations et l'accompagnement du changement.
- ☐ Contraintes économiques, de marché, de concurrence.
- ☐ Contraintes d'interface et de compatibilité technologique avec les éléments de l'environnement : standards applicables.
- ☐ Contraintes réglementaires liées à l'environnement : lois, règlement, nécessité de certification.
- ☐ Contraintes logistiques : maintenabilité, testabilité, accessibilité - aptitudes au déploiement, au retrait de service, au recyclage des déchets et constituants.

5.2 La démarche d'expression et de spécification du besoin

Cette démarche consiste à passer de la finalité du système à une définition aussi précise, complète et cohérente que possible, de l'ensemble des besoins et contraintes auxquels devra satisfaire la solution. L'objectif de cette démarche est de fournir le référentiel pour que le système une fois conçu et réalisé réponde aux attentes des parties prenantes concernées par son utilisation et son exploitation.

Ce référentiel est généralement appelé **cahier des charges fonctionnel** (CdCF). Il formalise ce qui est attendu du système (besoins et contraintes) par les parties prenantes utilisatrices et exploitantes, sans pour autant préjuger des choix techniques de la solution. Il définit ainsi la « charge » du fournisseur, à savoir ce qu'il est chargé d'obtenir, formulé sous l'angle strictement « fonctionnel », à savoir ce que le système doit faire, non comment il doit le faire ou être fait.

5.2.1 L'expression du besoin

L'expression du besoin est une opération complexe, qui met en œuvre à la fois :

- ☐ des aspects relationnels avec les multiples parties prenantes directement ou indirectement représentées pour faire exprimer les besoins et contraintes et rechercher des consensus,
- ☐ des aspects d'analyse, et de recadrage des besoins exprimés pour tenir compte des éventuels incohérences ou antagonismes entre besoins et/ou contraintes,
- ☐ des aspects d'analyse de l'existant, notamment des environnements d'exploitation (technique et humain) représentatifs de ceux dans lequel opérera le système ou s'intégrera son système de soutien logistique,
- ☐ des aspects d'analyse de mission, de validation de concepts d'opération, de simulation des scénarios opérationnels,
- ☐ des analyses d'impacts réciproques entre système et environnement et des risques associés,
- ☐ des analyse d'opportunité et de faisabilité,
- ☐ des aspects de validations de caractérisation par exemple sur des maquettes simulant des scénarios.

5.2.1.1 Etudes amont

Ces études préliminaires ou études amont concernent plus particulièrement les systèmes fortement novateurs. Elles ont pour objectif de préciser le problème en termes de finalité, de conceptualisation, de faisabilité, d'opportunité et ainsi de fournir un premier cadrage :

- ☐ **Finalité** : il s'agit d'exprimer et de caractériser le but final du système : cette expression doit faire l'objet d'un consensus.

L'émergence de la finalité peut représenter un processus long et complexe. La définition de la finalité et la conceptualisation des projets internationaux de grands instruments scientifiques (grands accélérateurs, télescopes spatiaux...) par de multiples équipes de chercheurs, par ailleurs en forte concurrence, en donnent des exemples significatifs.

- ☐ **Opportunité** : validation de la pertinence de la finalité exprimée, de réaliser un système pour y répondre, ou encore de la pertinence de choix de concepts système : études prospectives, études d'alternatives, études de marché, études préliminaires d'impacts.
- ☐ **Conceptualisation** : définition macroscopique des missions, des grands concepts système pour y répondre, des concepts d'opération associés.

Exemple : si la finalité du système est de rechercher des traces de vie sur une planète, la définition même des missions diffère selon la conceptualisation de la solution : sonde en orbite autour de la planète, robot déposé sur le sol de la planète.

- ☐ **Faisabilité** : vérification de disponibilité de capacités technologiques à l'horizon considéré, et appréciation de la cohérence des impacts économiques et temporels avec les contraintes du projet.

Ces études amont peuvent impliquer des projets de démonstrateurs, simulateurs, maquettes de justification, prototype de faisabilité...

5.2.1.2 Analyse de l'existant

Il s'agit de bien connaître l'état actuel de ce qui existe afin d'en tirer les enseignements par l'analyse :

- ☐ du système existant à remplacer ou à modifier. Cette analyse permet d'envisager la réutilisation, éventuellement partielle de l'existant, et d'éviter des régressions,
- ☐ des systèmes concurrents,
- ☐ de la ligne de produit à laquelle le système appartient,

- ☐ des environnements d'exploitation et de soutien dans lesquels le nouveau système s'intégrera,
- ☐ des opportunités d'utilisation ou réutilisation d'éléments existants,
- ☐ des insatisfactions des parties prenantes sur les systèmes existants, qui peuvent être utiles pour l'expression et la validation de leurs besoins pour le futur système.

5.2.1.3 Le recueil des besoins des parties prenantes

Il s'agit, dans un premier temps, de répertorier toutes les catégories de parties prenantes (individuelles ou collectives) susceptibles d'être intéressées ou concernées par l'utilisation et l'exploitation du système, ainsi que d'identifier les entités et personnes les plus aptes pour représenter chaque catégorie, en vue de recueillir les besoins, attentes et contraintes.

Les expressions de besoin sont ensuite intégrées par catégories puis inter-catégories. Dans cette démarche, on recherche des consensus en résolvant les conflits entre besoins contradictoires, en hiérarchisant les attentes, en fixant des flexibilités aux attentes les moins contraignantes et en vérifiant la pertinence et la complétude des besoins ainsi exprimés.

De multiples approches et outils méthodologiques sont utilisées :

- ☐ Définition d'un langage commun (thésaurus).
- ☐ Technique d'interview.
- ☐ Technique de recherche de consensus.
- ☐ Techniques de recueil d'expertise.
- ☐ Techniques de maquettage (maquette d'interfaces utilisateur et simulations d'hypothèses fonctionnelles).
- ☐ Techniques d'analyse fonctionnelle
- ☐ Sensibilisation à la valeur des besoins et contraintes exprimées (rapport utilité sur coût, retour sur investissement...).

5.2.1.4 L'analyse des fonctions rendues par le système

Le système est vu comme une boîte noire rendant des services à son environnement (cf. partie 1).

Ces services sont analysés, au niveau des interactions entre système et environnement, en termes de transformations, par le système, de flux d'entrée (matière, énergie, informations) en flux de sortie.

Pour chaque type de mission du système (opérationnelle ou logistique) au cours de son cycle de vie, dans ses différentes conditions d'emploi, on définit les scénarios opérationnels. On en déduira les enchaînement d'échanges attendus entre le système et les éléments de son environnement pour satisfaire les missions.

On obtient, au terme de cette analyse, les fonctions mises en œuvre par le système que l'on caractérise en termes de :

- ☐ condition de déclenchement,
- ☐ caractéristique des éléments de l'environnement mis en relation,
- ☐ nature et caractéristiques des flux échangés,
- ☐ scénarios d'échange,
- ☐ transformations à réaliser,
- ☐ niveaux de service attendus (temps de réponse, capacité, sûreté de fonctionnement...), éventuellement assujetties de marges de flexibilité,

- ☐ incertitudes et risques sur les fonctions et les niveaux de service : aléas de l'environnement et impacts potentiels sur le fonctionnement du système, actions requises en cas de défaillances des fonctions ou de non conformité des niveaux de services.

Les fonctions sont hiérarchisées (de l'essentiel au souhaitable).

Cette analyse peut s'accompagner de modélisation et de simulation : modélisation de l'environnement, modélisation des scénarios opérationnels, modélisation des dialogues opérateurs, modélisation sémantique (notamment pour les flux informationnels).

5.2.1.5 Caractérisation de l'environnement et études d'impact

De nombreuses contraintes sont dues à l'environnement du système (ambiances, autres systèmes, environnement social), de l'entreprise (stratégie, concurrence, aptitudes...), de la ligne de produit dans laquelle s'insère éventuellement le système, du projet (budget, délais) et éventuellement du programme qui l'englobe, des systèmes contributeurs au cycle de vie souvent préexistant, de la société (lois, réglementation) ...

La recherche des contraintes s'appuie sur le recueil des expressions des parties prenantes concernées par ces différents environnements, sur les analyses d'impacts réciproques entre système et environnements, souvent appelées études d'impact.

Elle conduit à définir les niveaux de protection à mettre en œuvre pour garantir l'innocuité et l'immunité du système, ainsi que les politiques à mener concernant les impacts sur l'environnement et la réponse aux attentes de ceux qui seront potentiellement concernés par ces impacts.

Au même titre que les fonctions, les contraintes sont caractérisées, quantifiées, hiérarchisées, dotées de marges de flexibilité, justifiables d'analyse de risques.

5.2.2 La formalisation du besoin : le cahier des charges

Le résultat des analyses de besoin doit être formalisé (en principe par le maître d'ouvrage) en vue de sa transmission aux parties prenantes réalisatrices (en principe représentées par le maître d'œuvre). Cette formalisation doit être non ambiguë, non contradictoire et aussi complète que possible pour permettre au maître d'œuvre d'élaborer une proposition de solution.

Cette formalisation, qui regroupe les exigences des parties prenantes utilisatrices et exploitantes, quelquefois appelées exigences initiales (nous y reviendrons au paragraphe 6.2.1) constitue le **cahier des charges fonctionnel (CdCF)**. Le terme fonctionnel a pour but de bien marquer qu'il définit le besoin, à savoir les services attendus du système par ses utilisateurs et exploitants (paragraphe 2.2.2.1) ainsi que les contraintes (paragraphe 2.2.2.2) imposées au système (le quoi ?), et non la solution (le comment ?). Le maître d'œuvre est ainsi libre des choix techniques, ce qui lui permet de définir, compte tenu de ses savoir-faire et de l'état de l'art, la solution la meilleure pour répondre à l'ensemble des besoins et contraintes.

Besoins et contraintes sont hiérarchisés (affectation de priorités), une certaine flexibilité étant introduite sur les éléments les moins contraignants (paragraphe 2.2.2.3). Le maître d'œuvre dispose alors de tous les éléments pour ajuster au mieux sa proposition de réalisation.

5.2.2.1 La formalisation des besoins fonctionnels

Elle recouvre :

- ☐ les missions du système, définies notamment par les scénarios opérationnels attendus dans chaque contexte d'utilisation dans chacune des phases du cycle de vie,
- ☐ les fonctions de service du système (issues de l'analyse fonctionnelle), correspondant aux besoins d'utilisation et d'exploitation du système. On associe à chaque fonction les critères d'appréciation exprimant les caractéristiques de qualité de service et les niveaux de service quantifiés attendus,

- ☐ les services associés à la fourniture de système, tels que la formation des exploitants et utilisateurs ou l'assistance au démarrage avec leurs critères d'appréciation,
- ☐ les caractéristiques de l'environnement du système, avec, selon l'étape d'élaboration du cahier des charges, tout ou partie des éléments suivants : l'existant, l'organisation utilisatrice, les scénarios opérationnels, les systèmes externes avec lesquels le système devra interagir, la spécification de leurs interfaces dites interfaces externes, la qualification des différents types d'exploitant et d'utilisateur du système, les évolutions prévisibles de cet environnement (par exemple, spécifier les normes d'interopérabilité avec les futurs systèmes de l'environnement).

5.2.2.2 La formalisation des contraintes

Dans un cahier des charges on distinguera deux types de contraintes exprimant :

- ☐ d'une part, des exigences en termes d'aptitudes et qualité de service concernant l'ensemble des missions : sûreté de fonctionnement, disponibilité, sécurité, évolutivité, testabilité, maintenabilité, interopérabilité, ergonomie...
- ☐ d'autre part des critères de réalisation et exigences diverses susceptibles d'influer sur les choix techniques comme la réutilisation d'un existant, la prise en compte d'un standard industriel, la conformité technique à une norme ou à une réglementation, des sous-traitances imposées ou encore l'utilisation de méthodes imposées. Ces contraintes se justifient à ce stade dans la mesure où elles ont des répercussions sur la maintenabilité, l'utilisabilité, l'opérabilité, la pérennité, l'organisation, l'homogénéité des méthodes et outils, le choix des hommes, la formation, la fabrication ou l'installation, toutes choses intéressant directement l'exploitant.

Tout comme les caractérisations des besoins fonctionnels, les caractérisations des contraintes doivent être, en principe, aussi indépendantes que possible des choix de solution (elles ne dépendent que de l'environnement d'exploitation) tandis que leur quantification doit être également justifiée. En effet, dans le cas contraire, elles risquent de limiter les degrés de liberté pour la conception, voire d'exclure des choix pertinents pour répondre aux besoins ou encore de restreindre les capacités d'optimisation.

5.2.2.3 Hiérarchisation et flexibilité des besoins et contraintes

Toute exigence, fonction ou contrainte, induit un coût sur la solution. Elle est donc sujette à analyse de la valeur en terme d'utilité sur coût ou plus généralement d'apport en regard des moyens que son obtention nécessitera (rapport bénéfices/moyens, apports/prix, quelquefois mesurable sous forme de retour sur investissement).

L'appréciation de l'utilité ou du niveau d'efficacité est du domaine du besoin, donc chiffrable par le maître d'ouvrage. Celle des moyens et donc du coût est, quand à elle, du domaine de la solution, donc chiffrable par le maître d'œuvre. Il y a donc un problème d'optimisation à résoudre dans un contexte client-fournisseur.

Le maître d'ouvrage a, en effet, la responsabilité de l'obtention d'un système répondant à sa finalité, à un prix cohérent avec ses contraintes économiques. Il est donc important que le maître d'ouvrage dispose d'une logique de hiérarchisation objective en précisant les exigences relevant des besoins et contraintes juste nécessaires, pour répondre à la finalité système. Les autres exigences ou niveaux d'exigences se situent alors dans le cadre de ce que l'analyse de la valeur nomme « taux d'échange » : quel complément de prix pour telle exigence complémentaire (ou niveau d'exigences plus élevé).

Il s'agit alors de hiérarchiser les exigences initiales et doter les moins contraignantes de marges de flexibilité.

La **hiérarchisation** se fait généralement par classes d'exigences (missions, fonctions, contraintes, ou groupe d'exigences). On distingue dans chacune des classes :

- ☐ les exigences primordiales pour la finalité du système et la prise en compte de l'environnement,
- ☐ les exigences qui sont plutôt liées à un confort d'utilisation et d'exploitation.

La **flexibilité** se situe dans le cadre des niveaux d'exigences (quantification des exigences). On peut distinguer alors :

- ☐ Les niveaux impératifs, car leur non-satisfaction entraînerait l'incapacité à réaliser la mission concernée, ou générerait des risques non acceptables pour le système ou l'environnement,
- ☐ Les niveaux souhaités, mais dont la prise en compte effective relèvera d'une approche « taux d'échange » avec le maître d'œuvre en regard des moyens complémentaires pour les obtenir. On notera que généralement on considère deux degrés de souhait :
 - un degré important : la non prise en compte de ce niveau devra être justifié, en regard des solutions possibles,
 - un degré souhaitable.

On notera que ces hiérarchisations et flexibilités constituent à la fois :

- ☐ pour le maître d'ouvrage, la possibilité de maîtriser les impacts économiques des besoins et contraintes, en modulant au mieux l'emploi de ses moyens, tout en assurant la réponse à la finalité,
- ☐ pour le maître d'œuvre, la capacité à cerner les priorités, et à se positionner de façon concurrentielle sur des critères objectifs et communs entre compétiteurs. Son rôle consiste alors, dans une approche systémique, à rechercher le meilleur ajustement de ses potentialités techniques au problème ainsi posé sachant que toute amélioration d'un niveau d'exigence a un coût et peut avoir des impacts négatifs sur d'autres exigences ou entraîner des risques de ne pas les atteindre.

Savoir penser le besoin (et non la solution)

De manière générale, nous avons généralement tendance à définir nos besoins à travers les solutions que nous entrevoyons, voire par analogie avec des solutions existantes. D'où la difficulté particulière de la responsabilité de maîtrise d'ouvrage qui nécessite de s'abstraire des solutions possibles pour remonter au véritable besoin et donner les éléments d'appréciation permettant de juger au mieux les offres de solutions proposées par les maîtres d'œuvre.

6 L'INGENIERIE DES EXIGENCES

6.1 Principes

6.1.1 Concepts de spécification et d'exigences système

Dans le principe,

- ☐ le **cahier des charges fonctionnel**, qui formalise le **besoin** à partir des expressions et caractérisations des besoins et contraintes des parties prenantes, est établi coté maîtrise d'ouvrage,
- ☐ en réponse le maître d'œuvre établit une **spécification** qui explicite sa compréhension du cahier des charges, la transcrivant selon les concepts système retenus, en tenant compte des contraintes des autres parties prenantes (réalisatrices).

Cette spécification, une fois validée par le maître d'ouvrage, formalise le problème à résoudre en **prescrivant** ce que le système à faire (solution au problème) doit faire, avec quels niveaux d'exigences il doit le faire, les aptitudes dont il doit être doté et les contraintes qui lui sont imposées.

Elle sert alors de **référentiel** aux activités de conception. A ce titre, elle reste, en principe, dans le strict domaine du problème, sans préjuger des choix techniques de solution, tout en cherchant à garantir la faisabilité de la solution par la prise en compte des contraintes des parties prenantes impliquées (conception, production, vérification, maintenance).

*Remarque : la spécification est donc un **modèle prescriptif** du système. (elle prescrit le « quoi ? », ce que l'on attend de la solution), ceci par opposition au modèle de conception qui est un **modèle constructif** (le « comment ? » est construite la solution, son architecture par exemple).*

Dans le but d'apporter de la rigueur, une telle spécification est aujourd'hui structurée en énoncés élémentaires appelés **exigences**.

6.1.2 Définition et caractéristiques des exigences

Définition. Une **exigence** prescrit une propriété dont l'obtention est jugée nécessaire. Son énoncé peut être une fonction, une aptitude, une caractéristique ou une limitation à laquelle doit satisfaire un système, un produit ou un processus.

Afin d'obtenir la rigueur nécessaire à une bonne spécification, les exigences système doivent présenter des caractéristiques de qualité telles que :

- ☐ sur le plan élémentaire :
 - **unicité** : une exigence ne traite que d'un sujet,
 - **précision** : une exigence est rigoureuse dans son expression,
 - **non ambiguïté** : une exigence ne permet qu'une interprétation possible,
 - **Pure prescription de résultat** : une exigence porte sur le quoi ? (ce qui est attendu), non sur le comment ? (la manière de l'obtenir),
 - **vérifiabilité** : à toute exigence est associée au moins une méthode permettant de vérifier son obtention (il serait inutile d'écrire une exigence dont on ne saurait montrer que le système, une fois réalisé, y satisfait),
 - **faisabilité** : une exigence doit pouvoir être satisfaite dans le contexte de l'état de l'art technologique, à l'horizon envisagé,
 - **réalisme** : une exigence doit pouvoir être satisfaite dans le contexte des contraintes du projet.

Ces deux dernières caractéristiques correspondent à la prise en compte des exigences des parties prenantes impliquées dans la réalisation.

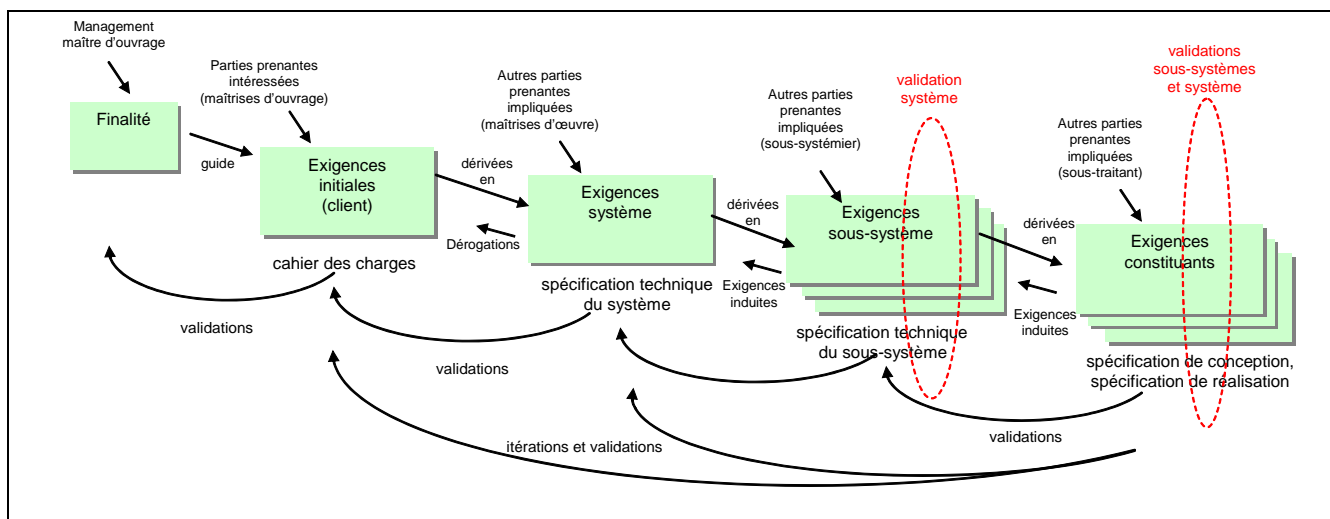
- ❑ sur le plan global :
 - *cohérence* : pas d'exigences incompatibles
 - *complétude* : pas de manque, l'ensemble du problème est pris en compte ; en particulier toute exigence du cahier des charges doit induire au moins une exigence système. A l'inverse, pas d'exigence inutile ou superfétatoire : toute exigence système doit avoir une justification.

6.1.3 Généralisation de la notion d'exigences

Compte tenu des bénéfices apportés par la notion d'exigences, l'emploi de ce type de formulation a été généralisé :

- ❑ aux expressions de besoin des parties prenantes : exigences des parties prenantes intéressées (utilisation, exploitation), puis exigences des parties prenantes impliquées dans la réalisation (conception, production...). Notons toutefois que tous les besoins ne sont pas forcément exprimés avec les mêmes niveaux de détail par toutes les parties prenantes au départ, car cela dépend du raffinement des choix qui seront fait. Certains besoins s'exprimeront donc progressivement sous forme d'exigences de plus en plus précises,
- ❑ aux spécifications des produits du système : sous-systèmes, constituants, produits contributeurs.
- ❑ Enfin pour chaque produit aux spécifications servant de référentiel aux différentes phases de son cycle de vie : référentiel servant à la conception, à l'industrialisation, à la production, à la mise en service, à la maintenance, au retrait de service.

La Figure 28 schématise la chaîne des exigences correspondante :



La figure met en évidence les types de référentiels d'exigences successifs avec la prise en compte des exigences du référentiel amont et des exigences anticipées ou non des parties prenantes impliquées.

Ainsi, les exigences système (voir paragraphe 6.2.2) sont déclinées à partir des exigences initiales en tenant compte des exigences du maître d'ouvrage, puis allouées aux sous-systèmes en fonction des choix d'architecture. Les exigences sous-systèmes sont alors les exigences ainsi allouées tenant compte des exigences des sous-systémiers impliqués.

Ces allocations-déclinaisons sur des constituants (compte tenu choix de conception associés) peuvent induire des exigences complémentaires (exigences induites) qui doivent être prises en compte et validées dans les référentiels amont, induisant ainsi des boucles dans le processus de conception. La cohérence entre les exigences des différents constituants ainsi que la complétude doivent être validée à chaque étape de décomposition.

Tout nouveau référentiel d'exigence est tracé et justifié par rapport à son référentiel amont (et aux exigences des parties prenantes nouvellement impliquées). Le cas où une exigence d'un référentiel amont ne serait pas vérifiée dans un référentiel aval ne peut se concevoir que si cette situation a donné lieu à un accord de dérogation par le spécificateur du niveau supérieur.

Figure 28 : La chaîne des exigences

La maîtrise des exigences, depuis les exigences caractérisant la finalité du système jusqu'aux exigences détaillées de production et de maintenance de chacun de ses constituants, est le fondement indispensable pour garantir la conformité du système une fois réalisé aux besoins exprimés.

Les référentiels d'exigence successifs doivent être élaborés, gérés et vérifiés, toute évolution, allocation, modification d'exigence doit être tracée. C'est le rôle de l'**ingénierie des exigences**.

6.2 Spécification des exigences système

Nous nous intéressons ici essentiellement aux exigences caractérisant le système dans son ensemble (par opposition aux exigences allouées à ses constituants), en distinguant :

- ☐ les **exigences initiales**, en principe formalisées par la maîtrise d'ouvrage, qui définissent les besoins et contraintes à partir des expressions de besoin des parties prenantes concernées par l'utilisation et l'exploitation du système,
- ☐ les **exigences système** qui tiennent également compte des exigences des autres parties prenantes (conceptrice et réalisatrices), en principe formalisées au niveau système par la maîtrise d'œuvre et validées par la maîtrise d'ouvrage. Elles sont quelquefois appelées « exigences techniques système », car prenant en compte les contraintes techniques de réalisation, (en notant toutefois que certaines exigences initiales peuvent être techniques (interfaces avec l'environnement par exemple).

Nous verrons dans la partie 3 comment ces exigences système sont déclinées en exigences spécifiant les constituants du système et leurs produits contributeurs.

6.2.1 Formalisation des exigences initiales

- ☐ Leur élaboration est traitée au paragraphe 5.2 ci dessus. Il est souhaitable d'appliquer la formulation en exigences dès la capture des besoins et contraintes des parties prenantes intéressées. On obtient, en les synthétisant et les classant dans une recherche de cohérence et complétude, les exigences initiales qui sont les exigences allouées au système par le maître d'ouvrage pour les besoins de son intégration dans l'environnement d'utilisation, de son utilisation et de son exploitation.

La formalisation finale des besoins et contraintes sous forme d'une liste d'exigences, de plus en plus utilisée, a pour objectif d'obtenir un cahier des charges fonctionnel (voir paragraphe 5.2.2) qui se rapproche des qualités attendues d'un ensemble d'exigences (voir paragraphe 6.1.2), tel qu'il peut être atteint au niveau du maître d'ouvrage qui en principe n'anticipe pas sur les concepts de solution et qui n'a généralement qu'une connaissance approximative de l'état de l'art et donc de ce qui est faisable et à quel prix.

Ceci conduit notamment à limiter les contraintes au juste nécessaire, à hiérarchiser les exigences et à associer des plages de **flexibilité** aux exigences non strictement contraignantes afin de permettre des recherches ultérieures de compromis dans un contexte d'analyse de la valeur (de type rapport utilité/coût) et de taux d'échange (voir paragraphe 5.2.2.3).

6.2.2 Spécification des exigences système

Dans la relation contractuelle traditionnelle entre un maître d'ouvrage et un maître d'œuvre, les **exigences système** relèvent :

- ☐ de la transcription, par le maître d'œuvre, des exigences initiales sur un concept système donné choisi par le maître d'œuvre et retenu par le maître d'ouvrage en prenant en compte les exigences des parties prenantes impliquées dans la réalisation.
- ☐ de la validation, par le maître d'ouvrage, de cette transcription :
 - vérification de complétude en terme de prise en compte des exigences initiales,
 - acceptation des impacts des choix de concepts du maître d'œuvre : pérennité, évolution des coûts de cycle de vie, contraintes induites,
 - acceptation des contraintes projet ayant des impacts sur les objectifs économiques et temporels du maître d'ouvrage, etc,

- détermination des niveaux de service requis : arbitrage concernant les hiérarchisations et flexibilités proposées.

Partant des exigences initiales et des exigences des autres parties prenantes impliquées (conception, développement, production, maintenance de la solution), l'élaboration des exigences système consiste à dériver un ensemble d'exigences optimisé en fonction des concepts systèmes retenus, spécifiant ce qui est attendu de la solution.

Dans ce contexte, le maître d'œuvre peut être conduit à ajouter des marges sur certaines exigences initiales. Outre les marges de sécurité pour les éléments critiques, souvent déjà prises par le client ou imposées par des normes, ces marges peuvent répondre à plusieurs besoins tels que :

- ☐ Se prémunir contre des risques liés aux incertitudes technologiques,
- ☐ Pouvoir absorber les évolutions au moindre coût, sans avoir à tout reprendre,
- ☐ Etre apte à absorber des dispersions du processus de production (produire et contrôler au moindre coût).

Ces marges sont toutefois limitées lorsqu'elles mettent en cause d'autres exigences (dont celles liées aux coûts) : Il faut éviter par exemple qu'une diminution du risque du maître d'œuvre se traduise par une augmentation du risque du maître d'ouvrage de ne pas atteindre certains de ses objectifs.

Pour justifier les déclinaisons d'exigences ou encore aider aux évaluations de compromis entre exigences antinomiques, cette élaboration peut requérir des modélisations, simulations, réalisations de maquettes d'expérimentation et de validation d'exigences, réalisations de prototypes de faisabilité technique, réalisations d'études économiques, réalisation d'analyse des risques, définitions de méthodes de test et d'essai...

Ces activités doivent permettre d'arriver à un ensemble cohérent, complet et optimisé d'exigences rigoureuses et quantifiées, conformes à l'état de l'art et aux réglementations, réalistes et vérifiables (voir paragraphe 6.1.2. qualité des exigences).

Une fois validé par le maître d'ouvrage, l'ensemble des exigences système (souvent appelé spécification système) constitue :

- ☐ le référentiel pour la conception du système garantissant que les exigences des parties prenantes, tant intéressées par le système qu'impliquées dans sa réalisation et son cycle de vie, ont été prises en compte,
- ☐ l'engagement du maître d'œuvre qui s'est assuré de la faisabilité du système dans les contraintes du projet

Bien distinguer cahier des charges et spécification

Exigences initiales (cahier des charges) et exigences système (spécification) constituent donc deux représentations du système selon la vision boîte noire. La première définit strictement le « besoin », la deuxième définit le « problème » à résoudre en cadrant la conception d'une solution à ce besoin selon des concepts système choisis et en connaissance de l'état de l'art.

Cette distinction est fondamentale dans la mise en œuvre de l'ingénierie système, quels que soient les contextes : système unique commandé par un maître d'ouvrage utilisateur ou exploitant à un maître d'œuvre ; système commandé par un maître d'ouvrage conduisant le maître d'œuvre à spécifier un produit pour un besoin plus général en vue de sa commercialisation ; réponse du maître d'œuvre à partir d'un produit existant ; industriel définissant un produit en vue de sa commercialisation et assumant les deux rôles entre lesquels il doit éviter toute confusion.

Rappelons les responsabilités :

- ☐ Le maître d'ouvrage est responsable du besoin (de l'intégration des expressions de besoin des parties prenantes intéressées). Son rôle est d'obtenir un système répondant à ce besoin et de le mettre à disposition des exploitants et utilisateurs. Il reste responsable de l'intégration du système dans l'environnement d'exploitation.
- ☐ Le maître d'œuvre est responsable de la solution. Son rôle est de fournir un système répondant à ce besoin. Il est à ce titre l'intégrateur des parties prenantes concernées par la réalisation (intégration de

leurs exigences, du projet de réalisation), ainsi qu'intégrateur, donc architecte, de la solution.

Toute confusion entre les deux rôles est préjudiciable à la mise en œuvre de bonnes pratiques d'IS et à la bonne organisation du projet. En voici des exemples : confusion entre cahier des charges et spécification, validation insuffisante de la spécification par le maître d'ouvrage, ingérence du maître d'ouvrage dans les choix de solution, dont sous-taitance directe de parties de solution sans passer par la validation du maître d'œuvre ...

6.2.3 Typologie des exigences

Il existe différentes manières de classer les exigences système (et de manière plus générale l'ensemble des exigences), généralement liées aux secteurs d'activité.

Les normes fournissent certaines grilles de classification. Par exemple, la norme ECSS-E-10A fournit une classification des exigences des systèmes spatiaux en 10 domaines (voir

Domaine	Explicitation	Exemples
Fonctionnel	Ce que le système doit faire	Mission, fonctions du système, modes et états du système...
Configuration	Sa composition	Composants majeurs, modularité, accessibilité, éléments fournis...
Interfaces	Ses interfaces externes et internes	Externe : lanceur, GPS, équipage, interne : segment sol-segment spatial...
Physique	Ses caractéristiques physiques	Taille, masse, volume, capacités...
Environnemental	Les conditions sous lesquelles les fonctions sont réalisées	Accélération, altitude, contamination, hygrométrie, radiations, vibrations...
Facteurs de qualité	Les niveaux auxquels les fonctions doivent être réalisées.	Sûreté, efficacité, fiabilité, maintenabilité, disponibilité, ergonomie, flexibilité
Exploitation	Les niveaux d'opérabilité	Autonomie, contrôle, management des dysfonctionnements
Soutien	Le soutien nécessaire à la réalisation des fonctions	Maintenance, approvisionnement, formation, logistique...
Vérification	Méthodes de vérification des exigences	Inspections, revues, essais...

Figure 29 : typologie des exigences des systèmes spatiaux (inspiration norme ECSS-E-10A)

La Figure 30 propose un exemple de classement générique, très schématique, des exigences système dans lequel on sépare deux grandes catégories d'exigences :

- ☐ **Exigences caractérisant les fonctions** (quelquefois dites exigences fonctionnelles), au sens des transformations de flux que doit faire le système pour fournir les services correspondant à ses missions opérationnelles ou logistiques associées. Par principe, ces exigences sont à la base de l'architecture fonctionnelle et seront allouées aux éléments de la décomposition fonctionnelle.
- ☐ **Autres exigences** (quelquefois dites exigences non-fonctionnelles) : aptitudes requises du système face aux différentes contraintes d'aptitude globale, d'environnement, de cycle de vie... Ces exigences non directement attribuables aux fonctions, ont des impacts sur les choix techniques et peuvent générer des fonctions techniques complémentaires (fonctions d'interface, de sécurité, de maintenabilité...).

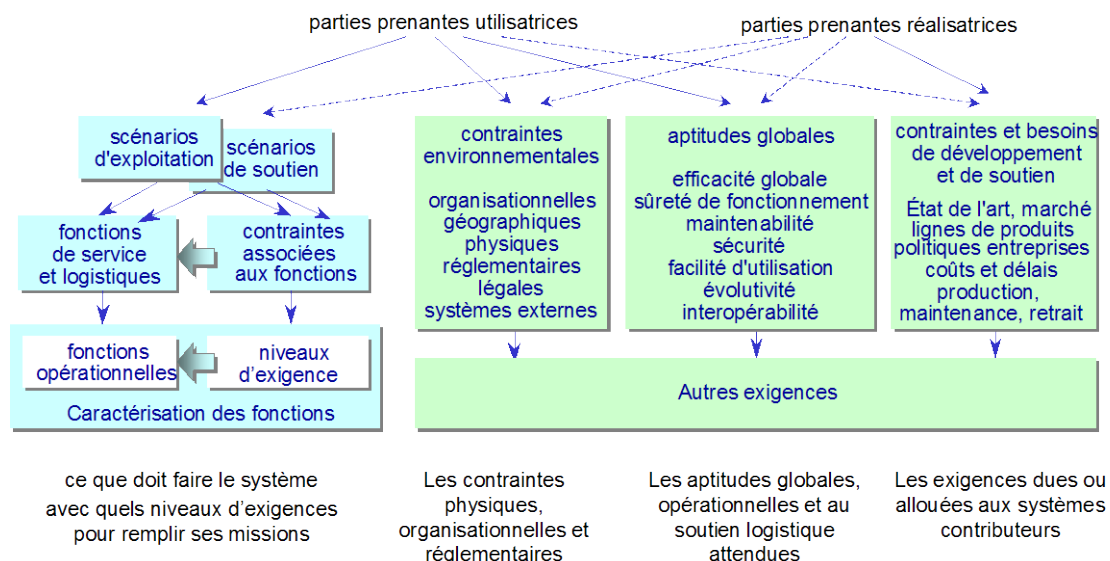


Figure 30 : Exemple de typologie et origines des exigences système

6.3 Référentiels d'exigences

Ainsi le développement d'un système est régi par deux référentiels d'exigences :

- ☐ le référentiel **d'exigences initiales** qui exprime le besoin du client du système,
- ☐ le référentiel **d'exigences système** (souvent appelées exigences techniques système) qui se réfère au précédent en ajoutant les contraintes du concept système retenu. Une fois validé par le maître d'ouvrage, il pilote la conception.

Au cours de la conception décrite en partie 3, les exigences système sont allouées aux sous-systèmes puis à leurs constituants (ainsi qu'à leurs produits contributeurs), générant ainsi, pour ces éléments, des exigences dites dérivées.

Tout constituant (ou produit) a donc deux référentiels d'exigences régissant son développement :

- ☐ le référentiel des **exigences allouées** au constituant définies par le concepteur/réalisateur du constituant de rang supérieur,
- ☐ le référentiel des **exigences du constituant** (exigences techniques constituant) spécifiées par son concepteur/réalisateur et validées par le responsable du constituant de rang supérieur.

En principe, les exigences du constituant déclinent les exigences allouées en tenant compte du concept de constituant retenu. Selon les choix de conception possibles, des écarts (voire impossibilités) de satisfaction d'exigences allouées peuvent apparaître : elles feront alors l'objet de recherche de compromis entre les partenaires (voire d'accord de dérogation pour non conformité).

A ce niveau, les exigences constituants sont quelquefois qualifiées de « techniques » pour exprimer qu'elles tiennent compte des points de vue technique du développeur du constituant, qui apporte non seulement la garantie de faisabilité technique mais rajoute ses exigences de respect de l'état de l'art de son domaine, et pour les différencier des exigences allouées.

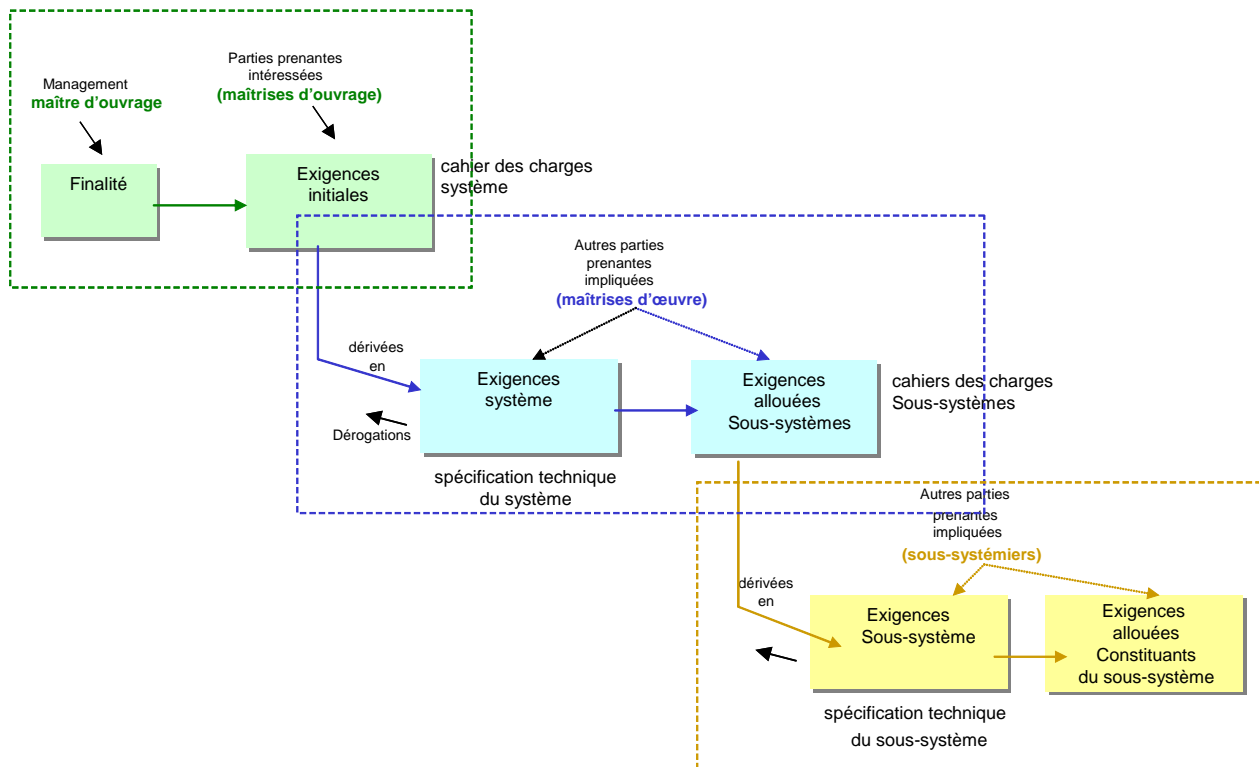


Figure 31 : Principe de dérivation des exigences sur les constituants d'un système

Au terme de la conception du système, la définition validée du système et de ses constituants fera l'objet de la formalisation des **exigences spécifiées** du système et de ses constituants. Elles constituent les référentiels pour produire ou intégrer le système et ses constituants, les vérifier, ainsi que pour les mettre en œuvre, les maintenir en condition opérationnelle, les retirer du service... etc.

6.4 Management des exigences

Pour s'assurer que le système réalisé répondra à sa finalité et satisfera à toutes les exigences système, il est nécessaire :

- ☐ De suivre l'historique des exigences depuis les premières caractérisations de finalité, de besoin et de contraintes jusqu'aux exigences de réalisation allouées à chaque constituant. C'est le domaine de la **traçabilité et du suivi de maturité des exigences**.
- ☐ De **vérifier et valider** les **référentiels d'exigences** successifs et de vérifier et valider leur obtention au niveau des constituants obtenus et, in fine, au niveau du système réalisé.

6.4.1 Gestion et traçabilité des exigences

Une exigence doit être caractérisée par des attributs et des relations avec les autres éléments du problème, de la solution ou du projet. La Figure 32 en donne un exemple.

La gestion des exigences consiste à maintenir à jour et conserver l'historique de tous ces liens tout au long du cycle de vie du système.

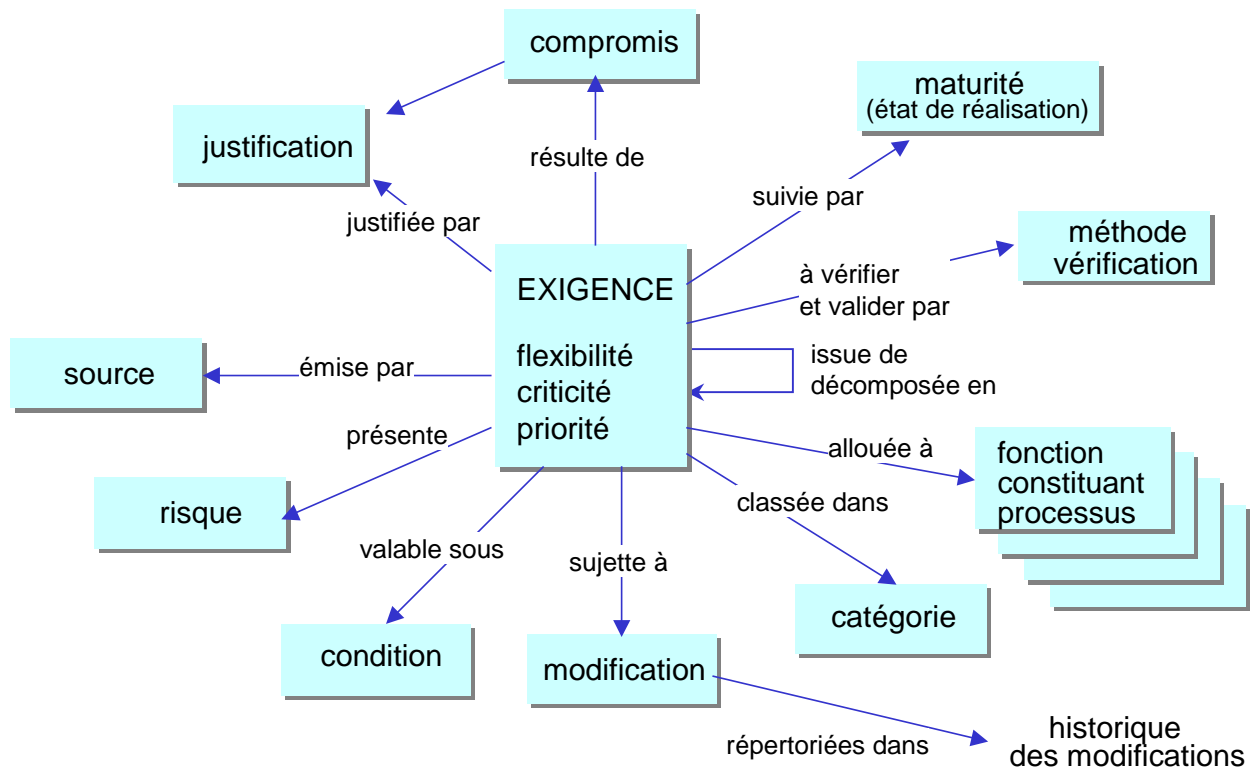


Figure 32 : Modèle de données des exigences

La traçabilité des exigences concerne plus particulièrement les liens établissant la correspondance entre les résultats successifs, obtenus au cours de l'analyse des besoins et de la conception.

Cette gestion des exigences est essentielle au pilotage de la définition, de l'intégration et de l'évolution du système et de ses constituants. Voici quelques exemples de liens importants dans ce contexte :

- ❑ Entre exigences de différents niveaux d'analyse et conception (exigences de parties prenantes vers exigences systèmes puis vers exigences de réalisation). Ces liens de traçabilité dits aussi liens de dérivation, permettent de vérifier que les exigences de plus haut niveau sont bien déployées, décomposées et transmises aux niveaux plus détaillés, tout au long de la définition du système, et de remonter à la source si une exigence évolue ou s'avère poser problème, (voir Figure 32).
- ❑ Entre exigences et éléments de décomposition ou éléments d'architecture (fonctions, objets, constituants, interfaces, produits, services, processus associés). Ces liens de traçabilité permettent d'analyser l'impact d'une évolution d'exigence initiale sur les spécifications ou les définitions des constituants du système et des processus associés, et inversement, l'impact éventuel de toute modification technique sur la tenue des exigences initiales.
- ❑ Entre deux exigences s'avérant incompatibles dans le contexte des solutions envisageables et la justification du compromis décidé. Ces liens permettent d'une part de suivre le risque éventuel inhérent à l'antagonisme résiduel, et d'autre part, lors d'une demande d'amendement, de ne remettre en cause le compromis initial ou le choix de priorité qu'en parfaite connaissance de cause.
- ❑ Entre exigences et méthodes associées de vérification de leur obtention, préparant ainsi la vérification et la validation des produits (voir paragraphe suivant).

6.4.2 Vérification et validation des exigences

Nous considérons ici deux aspects :

- ☐ Tout référentiel d'exigences (que ce soient les exigences initiales, les exigences système, les exigences de réalisation) doit être vérifié et validé, afin de garantir que la suite de la conception est fondée sur des bases sûres.
- ☐ Les constituants du système, le système lui-même ainsi que ses produits contributeurs, doivent être vérifiés et validés, à travers la vérification de conformité à leurs référentiels d'exigences.

Les approches génériques de vérification et validation (V & V) sont traitées dans la partie 4, chapitre 12.3.2

Précisons ici que la V et V s'applique à tout produit de l'IS :

- ☐ la **vérification** a pour but de s'assurer qu'il a été bien réalisé (il est conforme à son référentiel d'exigences de réalisation),
- ☐ la **validation** a pour but de s'assurer qu'il répond à son besoin (il est conforme aux exigences allouées par le responsable du constituant de rang supérieur).

6.4.2.1 Vérification et validation des référentiels d'exigences

Le référentiel d'exigences initiales (en général le cahier des charges fonctionnel du système) et le référentiel d'exigences système font l'objet de vérifications tout au long de leur élaboration, pour s'assurer que cette élaboration est bien faite, selon les règles de l'art, et in fine de validation pour s'assurer qu'ils répondent bien aux besoins.

La vérification consiste à s'assurer que les exigences du référentiel vérifient individuellement et collectivement les caractéristiques de qualité décrites en 6.1.2, la validation que les exigences des parties prenantes (besoins ou contraintes) sont bien prises en compte (soit conformité, soit justification de non-conformité).

Outre la validation de conformité par rapport aux documents d'expressions des besoins des parties prenantes utilisatrices et exploitantes, les exigences initiales font l'objet de **validation externe**, généralement sous forme de **revues** avec les parties prenantes concernées : il s'agit de vérifier qu'elles expriment bien le réel besoin et que les compromis effectués sont acceptables.

Les exigences systèmes sont validées par rapport aux exigences initiales et aux exigences des parties prenantes réalisatrices. Cette validation, fondamentale pour conférer aux exigences système le statut de référentiel, est généralement finalisée lors d'une **revue conjointe** entre maîtrise d'ouvrage et maîtrise d'œuvre.

Cette logique de vérification et validation des référentiels d'exigences se généralise à tout élément de l'arborescence produit du système (sous-système, constituant, produit contributeur) :

- ☐ pour les référentiels régissant le développement des produits : référentiel d'exigences allouées exprimant le besoin du produit et référentiel d'exigences produit régissant la conception du produit,
- ☐ pour les référentiels de production et d'intégration qui devront également faire l'objet de vérification et validation.

Les itérations entre exigences initiales et compromis d'optimisation faits au cours de la conception conduisent à des vérifications de compatibilité d'ensemble en cours et en fin de conception. Il s'agit notamment de vérifications de cohérence transversale entre les référentiels d'exigences de constituants de même rang.

6.4.2.2 Vérification et validation du système

Notons dès maintenant que la formulation des exigences est la clé de la vérification et de la validation du système une fois réalisé.

Celui-ci doit être alors (voir partie 3, chapitre 9.2) :

- ☐ vérifié en conformité aux exigences système, prouvant ainsi qu'il a été bien fait selon sa spécification,
- ☐ validé en conformité aux exigences initiales, prouvant ainsi qu'il répond aux besoins et contraintes exprimés par le maître d'ouvrage.

Ce principe se généralise à tout produit du système, qui est vérifié par rapport à ses exigences techniques (il a été bien réalisé en conformité à son référentiel de réalisation) et validé par rapport à ses exigences allouées par son client (il répond à ce pourquoi il a été fait, en conformité à son cahier des charges).

6.4.3 Maturité des exigences

L'avancement de l'effort de développement d'un système peut être suivi à travers l'évolution de la « maturité » des exigences :

- ☐ En phase d'analyse des besoins et spécification système, via le cycle de vie des exigences (indicateur sur les pourcentages d'exigences initiales ou soumises qui sont à l'étude, vérifiées, validées, acceptées).
- ☐ en phase de conception du système, via l'avancement de l'allocation des exigences système aux sous-systèmes, puis aux constituants (donné par des indicateurs tels que pourcentage d'exigences allouées d'un niveau au niveau inférieur),
- ☐ en phase d'intégration, via les pourcentages d'exigences vérifiées sur les produits (en tenant compte des risques de régression dans la suite des opérations d'intégration).

Maîtriser le système par les exigences

En conclusion, les exigences guident toutes les étapes de la définition d'un système depuis la formulation de la finalité, jusqu'à la qualification.

Elles formalisent l'expression des besoins et les engagements des parties prenantes.

Elles permettent, tout au long du développement, tant de prendre en compte les besoins et de vérifier leur satisfaction que de maîtriser les engagements des parties prenantes et de vérifier leur tenue.

Ceci a conduit à définir une « ingénierie des exigences » qui, grâce à des méthodes, règles et processus, a pour but de maintenir un référentiel unique du système.

L'élaboration des premières étapes du référentiel des exigences (exigences initiales et exigences systèmes) a fait l'objet de cette partie.

La partie suivante qui traite du système réalisé va montrer comment le système est conçu à partir de ce référentiel, comment le référentiel d'exigences se complète pour conduire à la définition du système, et comment le système sera vérifié et validé par rapport à ce référentiel.

Il est clair que l'ingénierie des exigences (formalisation du problème sous forme d'exigences et le suivi des exigences jusqu'à la qualification du système) a fait faire un pas très important à l'approche méthodologique de la définition et de la validation des systèmes. Les outils de gestion des exigences apportent une aide indispensable pour aider à la saisie, au suivi et à la traçabilité des exigences.

Reste que le véritable problème, qu'aucun outil ne peut résoudre ni garantir, est d'élaborer les bons référentiels d'exigences :

- ☐ celui des exigences initiales qui précisent de manière exhaustive les besoins et contraintes justes nécessaires, ,
- ☐ celui des exigences techniques du système et de ses produits constitutifs et contributeurs qui convergent vers une définition répondant à ces justes besoins et contraintes compte tenu des opportunités et contraintes du domaine de la solution (technologies, état de l'art, environnement industriel...), dans une

recherche d'optimisation globale c'est à dire en équilibrant au mieux les rapports de type efficacité sur coût des aspects de conception, de vérification, de production, d'exploitation, de maintenance et de retrait. Ce sera l'objet du chapitre suivant consacré dans sa première partie à la conception du système

PARTIE 3 : LA SOLUTION = LE SYSTEME REALISE

Guide de lecture de la partie 3

La partie précédente a traité de l'analyse du besoin formalisé sous forme d'exigences initiales, puis de « l'énoncé » du problème à résoudre pour y répondre, formalisé sous la forme des exigences systèmes. Cette partie traite du système réalisé, en présentant ce qu'est le système, comment il est constitué (donc la manière dont il est conçu et réalisé) et comment il évolue de sa mise en service à son retrait de service.

Les grandes étapes considérées sont :

- ☐ La conception
- ☐ La réalisation
- ☐ La vie opérationnelle

La conception

La Figure 33 synthétise les grandes lignes du chapitre 8 qui présente le système tel qu'il est conçu.

Le système y est vu comme résultant d'une composition de ses éléments, définie par une architecture.

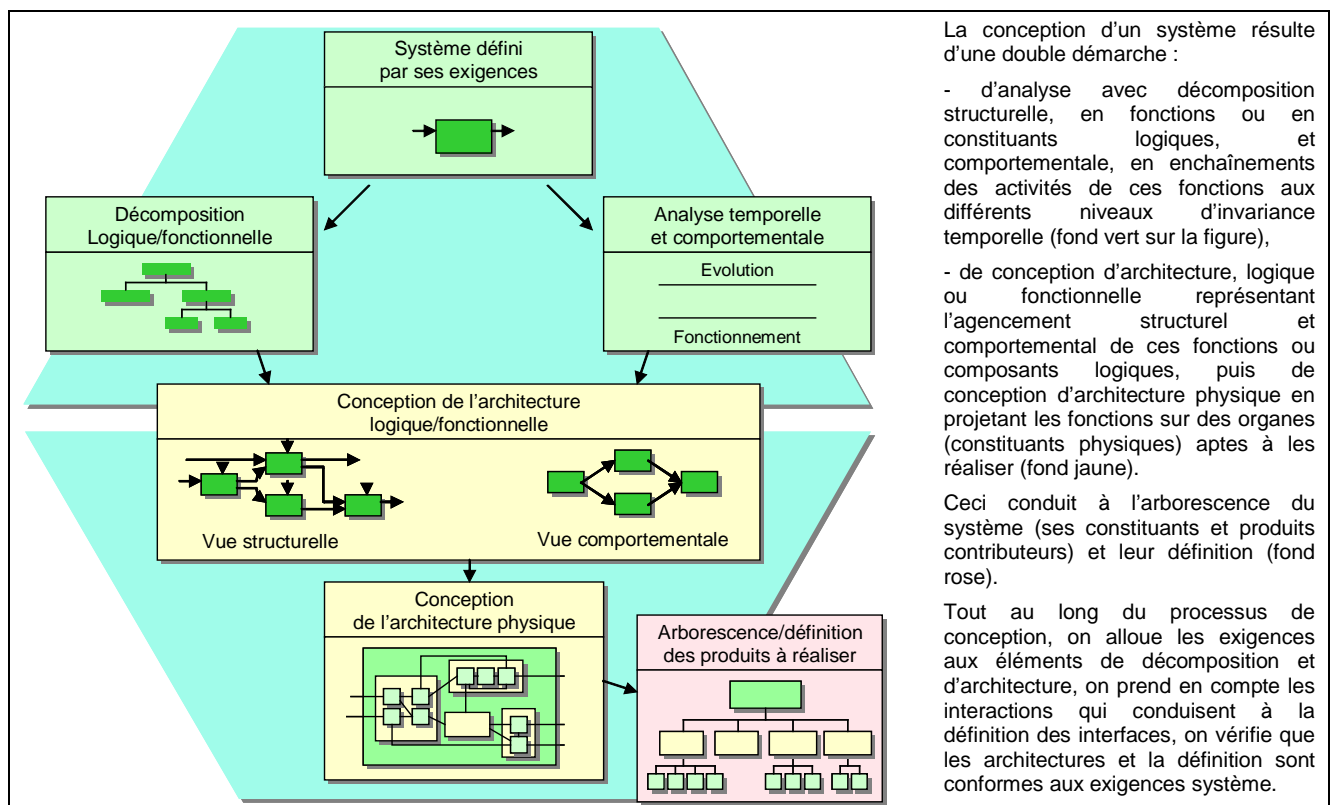


Figure 33 : Principe de la conception d'un système

1 - Le système résulte d'une composition

Tout système est une composition d'éléments en interaction.

Toute conception commence donc par une décomposition du système en éléments en tenant compte de leurs interactions et en leur allouant des exigences par déclinaison/répartition des exigences système. La décomposition passe par une analyse fonctionnelle interne afin de décomposer toutes les fonctions de services dans toutes les conditions d'emploi. Elle peut se faire en éléments logiques (modules fonctionnels) ou directement en éléments physiques (constituants) notamment en cas de réutilisation d'existants.

Ceci conduit à une double opération d'analyse/décomposition :

- ☐ Décomposition structurelle des fonctions de services en sous-fonctions ou constituants logiques transformant des flux opérants (analyse fonctionnelle interne),
- ☐ Analyse temporelle : analyse en niveaux d'invariance temporelle et analyse comportementale sur ces différents niveaux définissant la manière dont les activités doivent être enchaînées et donc dont les fonctions doivent être pilotées (déclenchées, arrêtées, régulées) par des flux de contrôle.

2 – Le système est défini par son architecture et la spécification de réalisation de ses constituants

Les éléments de la décomposition des différentes fonctions de service sont réorganisés pour constituer l'architecture du système.

L'architecture logique/fonctionnelle est vue comme une réorganisation structurelle des fonctions ou constituants logiques, feuilles de l'arborescence (ou ensemble logique de feuilles) arrêtée à un certain niveau de granularité, reliés par leurs interactions.

La vision comportementale associée, sous forme de l'enchaînement des activités de ces mêmes fonctions ou constituants logiques, permet de définir le pilotage de ces fonctions.

L'architecture physique est alors obtenue à partir de l'architecture logique par affectation des fonctions et sous-fonctions à des organes (constituants humains ou technologiques), et la définition complémentaire des constituants techniques et d'interfaçage nécessaires.

Les choix de composants et d'architectures, notamment au niveau physique sont guidés par les possibilités technologiques, leur pertinence en terme de réponse aux exigences et aux objectifs économiques, ainsi que les logiques et contraintes des métiers et de l'organisation industrielle, les solutions candidates étant comparées en termes d'efficacité et d'impacts économiques. Les architectures sont vérifiées par rapport aux exigences système.

La conception se termine par la spécification de réalisation (ou d'acquisition) pour les composants, d'intégration, de production et de maintenance de l'ensemble des produits de l'arborescence du système et de leurs produits contributeurs. Cela constitue la définition du système.

Cette vision de la conception s'applique aux systèmes techniques. Nous ajoutons quelques éléments concernant la prise en compte de l'humain tant collectif qu'individuel dans les systèmes dits « socio-techniques » (prise en compte des aspects organisationnels ainsi que des considérations ergonomiques). Notons qu'une organisation peut être décrite comme une architecture avec, vu sous l'angle fonctionnel, un ensemble de processus coordonnés et, vu sous l'angle organique, un ensemble d'entités opérationnelles organisées pour réaliser les activités des processus.

La réalisation

La Figure 34 introduit dans ses grandes lignes le chapitre qui montre comment le système est amené à être prêt pour son utilisation : Après avoir été conçu en vue de sa réalisation, il est intégré, vérifié, validé et qualifié (IVVQ).

Dans le cas d'un système produit en multiples exemplaires, on peut avoir plusieurs phases d'IVVQ conduisant successivement à :

- ☐ la qualification de la définition, réalisée par exemple sur des prototypes de définition de tout ou parties du système, autorisant le passage à l'industrialisation,
- ☐ la qualification industrielle, réalisée par exemple sur un ou des prototypes, voire une présérie, autorisant le lancement de la production de série,
- ☐ la qualification opérationnelle, réalisée par exemple sur un ou plusieurs exemplaires, autorisant la mise en exploitation. Elle peut s'accompagner de certifications délivrées par des organismes tiers.

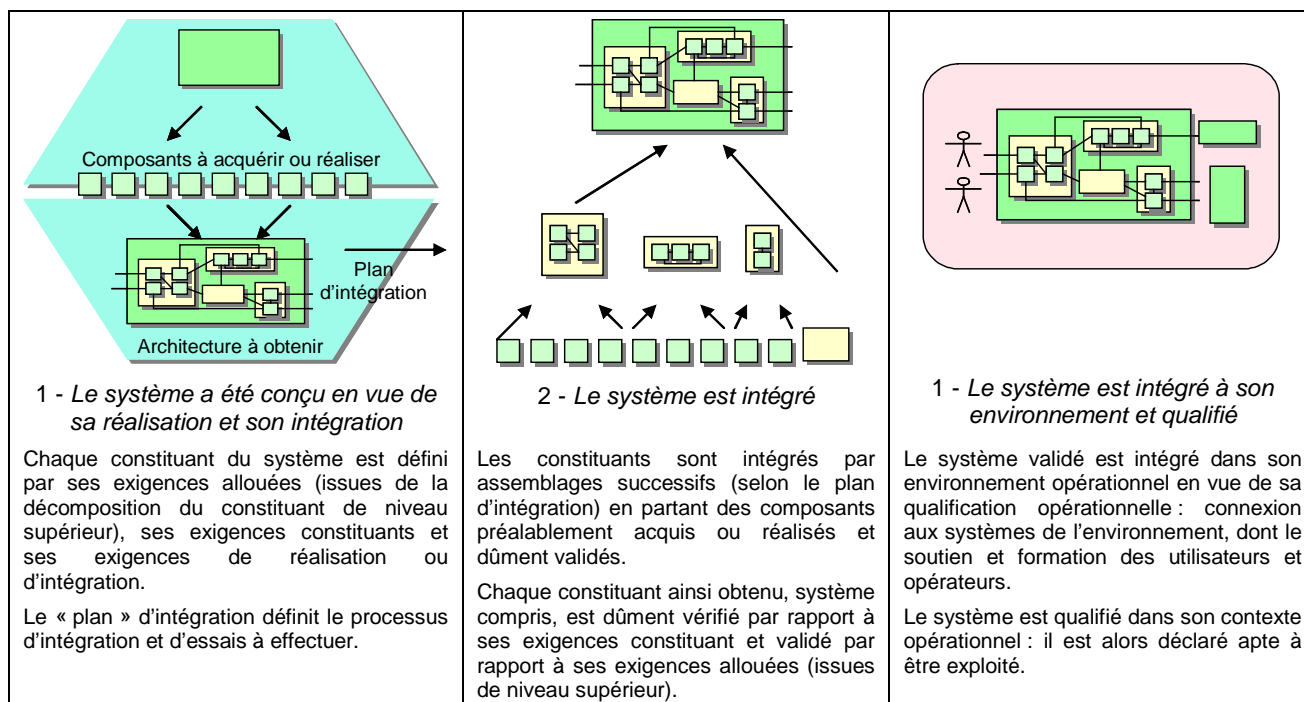


Figure 34 : Principe de l'IVVQ

La vie opérationnelle

Une fois qualifié, le système peut entrer dans sa vie opérationnelle schématisée Figure 35.

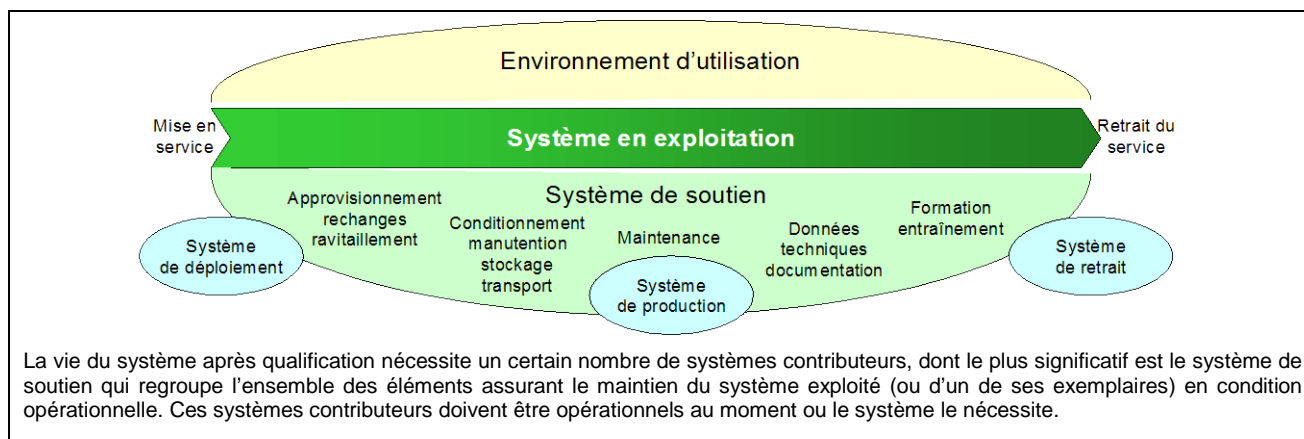


Figure 35 : La vie opérationnelle du système

Le chapitre 10 consacré à cette vie opérationnelle traite pour l'essentiel du système de soutien, souvent appelé système de soutien logistique du fait de l'importance qu'y prennent souvent les aspects logistiques, avec une focalisation sur les problématiques de la maintenance.

L'ingénierie du soutien, généralement appelée Analyse du Soutien Logistique (ASL), y est abordée comme partie intégrante de l'ingénierie système. Il s'agit de garantir la cohérence opérationnelle globale de l'ensemble du système et de son soutien en leur conférant de manière coordonnée les aptitudes respectives à être maintenu et à maintenir, tout en optimisant le coût de possession du système dont le soutien représente un poste majeur, souvent supérieur à celui de l'acquisition initiale.

7 PREALABLE

Le système réalisé est la concrétisation de la solution retenue pour répondre au problème posé.

A partir du recueil et de la formalisation du besoin et des contraintes auxquels le système doit répondre, il a fallu procéder à sa conception et à sa réalisation. A partir de là commence la vie opérationnelle du système qui s'étend de son transfert vers l'utilisation jusqu'à son retrait du service.

Pour décrire les concepts associés, cette troisième partie est structurée selon les grandes étapes suivantes :

☐ La conception.

Elle fait passer le système de l'état spécifié sous la forme des exigences système à l'état conçu (apte à être réalisé) sous forme de la « définition » d'une solution répondant aux exigences.

☐ La réalisation (du système ou du premier exemplaire).

Elle fait passer le système de l'état conçu à l'état réalisé ou qualifié (apte à être utilisé et/ou fabriqué en série). Le processus correspondant est appelée IVVQ, pour Intégration, Vérification, Validation, Qualification.

☐ La vie opérationnelle du système.

Le système (ou chacun de ses exemplaires) doit être produit, mis à disposition, déployé dans son environnement opérationnel, exploité et maintenu en condition opérationnelle, et, in fine, retiré du service.

8 LE SYSTEME REALISE EST LE RESULTAT D'UNE CONCEPTION

La partie 1 a montré que tout système peut être vu comme une composition d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement du système. Ces éléments sont agencés pour répondre à la finalité du système et donc, comme nous l'avons vu dans la partie 2, aux exigences système. La conception du système implique ainsi la conception ou le choix des éléments et la définition de leur agencement.

Le problème de conception d'un système répondant à l'ensemble de ses exigences étant complexe, on ne peut d'emblée définir une solution.

On passe donc par une logique de **décomposition** du problème en sous problèmes jusqu'à ce que l'on arrive à des sous-problèmes suffisamment simples pour trouver des solutions soit sous forme de produits maîtrisés, soit par le biais de sous-traitance à un métier. On se trouve alors devant un problème de « recomposition ».

Cette « recomposition » relève alors, au stade de la conception, d'un problème d'agencement (d'interfaçage) de ces éléments de solution, donc de définition de l'**architecture** du système.

Cette définition d'architecture prépare la « recomposition » physique qui correspondra à l'**intégration** du système à partir de ces éléments une fois qu'ils auront été acquis ou réalisés.

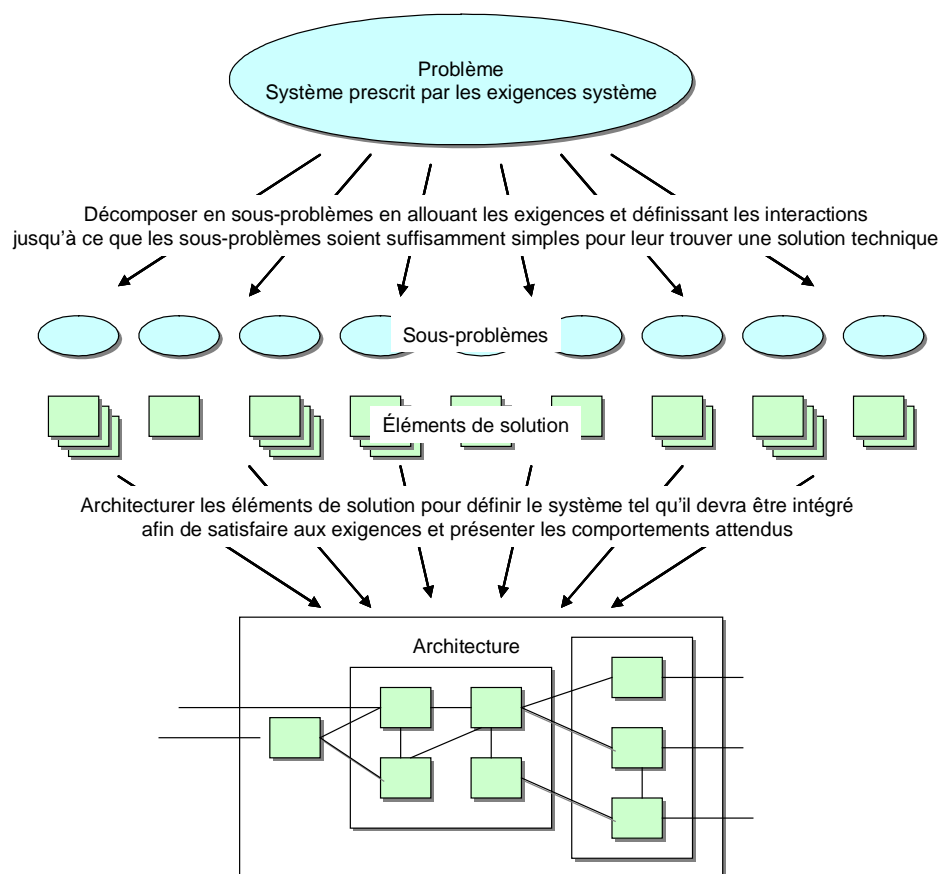


Figure 36 : Principe de décomposition et d'architecture

On aura dans cette problématique de conception (schématisée sur la Figure 36) à faire face à deux défis :

- ☐ Obtenir une **solution conforme aux exigences système**, ce qui implique :

- de décomposer en éléments suffisamment indépendants, en allouant toutes les exigences et en identifiant toutes leurs interactions,
 - puis d'architecturer (définir les interfaces pour supporter les interactions) et intégrer en conformité à l'architecture définie de manière à satisfaire à toutes les exigences et obtenir tous les interfonctionnements attendus (en maîtrisant les comportements émergents non intentionnels).
- ❑ Tendre vers une **solution globalement optimisée** : chaque sous problème étant susceptible d'être résolu par différentes solutions, il s'agira d'évaluer et comparer ces solutions candidates (répondant aux exigences) en analysant leurs impacts sur tout le cycle de vie du système, afin de choisir la meilleure en vue de l'optimisation d'ensemble.

Nous nous proposons de regarder successivement le système comme :

- ❑ une composition d'éléments en synergie, résultant d'une approche de décomposition du système en éléments, auxquels les exigences système ont été allouées et dont les interactions ont été définies.
- ❑ une architecture regroupant ces éléments et organisant leurs interrelations.

Au même titre que la décomposition se fait par strates successives (sous-systèmes, constituants de différents niveaux de granularité, composants) conduisant à une arborescence, l'architecture peut être représentée à différents niveaux de granularité.

8.1 Le système repose sur une composition d'éléments en interaction

La problématique consiste à ouvrir la boîte noire, formalisée par les exigences système, pour définir les éléments du système et leurs interactions. Ce processus d'ouverture commence par une décomposition itérative du système en éléments en prenant soin à chaque itération :

- ❑ de décliner les exigences de l'élément à décomposer sur les éléments résultant de sa décomposition, garantissant ainsi que tout élément satisfait aux exigences systèmes,
- ❑ d'identifier les interactions entre ces éléments de décomposition, ce qui permettra de définir les interfaces.

Cette décomposition peut être vue sous l'angle fonctionnel : le système est alors appréhendé comme composé de fonctions en interactions. Elle peut être vue sous l'angle organique (physique) : le système est appréhendé comme composé d'organes ou constituants physiques en interaction.

8.1.1 Composition fonctionnelle et physique

En principe, la composition de la solution est d'abord pensée en termes fonctionnels : les fonctions attendues du système (fonctions dites de service représentant ce que doit faire le système ou traduisant la réponse à certaines contraintes environnementales) sont décomposées en sous-fonctions (dont l'arrangement devra reconstituer le fonctionnement attendu du système) : ainsi obtient-t-on l'**arborescence fonctionnelle** du système.

Cette décomposition fonctionnelle des fonctions de service en sous-fonctions constitue l'**analyse fonctionnelle interne**. Elle est le prolongement de l'analyse fonctionnelle externe qui a, préalablement, obtenu les fonctions de service par décomposition des missions attribuées au système.

Par la suite (après la conception de l'architecture fonctionnelle), ces fonctions sont allouées à des organes (les constituants physiques du système) aptes à les réaliser. Le système est alors vu comme une composition d'organes aptes à réaliser les fonctions avec les performances voulues.

La démarche fonctionnelle descendante, préalable aux choix physiques, fige des principes de solution. Elle est indispensable pour les systèmes novateurs où l'on a intérêt à repousser le plus possible les choix physiques qui limitent la généralité des solutions et risqueraient de fermer des potentialités intéressantes. Elle reste la référence pour les évolutions futures de tout système.

Dans la pratique les ingénieurs incluent, dans leur démarche d'analyse descendante, tant les schémas architecturaux préexistants, que l'existence de constituants ou équipements disponibles ou réutilisables. Du fait de l'expérience acquise, certaines parties de la décomposition du système peuvent être

directement abordées dans une démarche ascendante en termes d'intégration de constituants logiques ou physiques. A noter qu'il est impératif de valider leur pertinence en terme de réponse aux exigences (tant fonctionnelles que non fonctionnelles) et de capacité de prise en compte des interactions requises avec les autres constituants ou avec l'environnement du système. En tout état de cause, on choisit les solutions qui répondent aux critères de valeur et on choisit parmi celles retenues celles qui optimisent les critères du projet.

Les choix fonctionnels et techniques peuvent induire de nouvelles fonctions :

- ☐ fonctions d'interface (par exemple de lubrification pour des interfaces mécaniques, de traduction sémantique et syntaxique pour des interfaces informationnelles, d'adaptation pour les interfaces électriques ou électroniques),
- ☐ fonctions de gestion du parallélisme pour obtenir les capacités ou performances attendues,
- ☐ fonctions de sûreté de fonctionnement et sécurité (tolérance aux pannes par utilisation de redondance, protection de l'environnement face aux comportements dangereux d'éléments du système ou à l'inverse protection de ces derniers face aux agressions de l'environnement).

Ces fonctions techniques complémentaires doivent être également allouées à des organes. Ainsi obtient-on *in fine* la décomposition organique ou physique du système.

8.1.2 Arborescences système et arborescence produit

Les arborescences fonctionnelle et physique d'un système ne se recouvrent pas, car l'affectation des fonctions aux organes n'est pas biunivoque (regroupement ou éclatement de fonctions sur les organes). Ceci conduit généralement à passer par l'intermédiaire de la conception d'une architecture logique, organisant les fonctions en modules fonctionnels pour construire l'architecture organique et en déduire l'arborescence organique ou physique du système (voir paragraphe 2.3.1).

Dans la pratique, ce processus de décomposition-conception est itératif et se répète à différents niveaux de décomposition.

Au premier niveau de décomposition, le système est vu comme constitué d'un certain nombre de constituants (de rang 1) généralement appelés sous-systèmes. L'ingénierie système conduit à définir les sous-systèmes, les interfaces entre ces sous-systèmes, ainsi que, rappelons-le ici, les produits contributeurs nécessaires au cycle de vie du système en vue de l'intégration du système à partir de ces sous-systèmes, sa vérification, son déploiement, son exploitation, sa maintenance, son retrait de service.

L'opération est répétée sur chacun des constituants (ou produits contributeurs) ainsi obtenu (jusqu'au critère d'arrêt jugé utile). Les composants, feuilles de l'arborescence doivent être spécifiés en terme d'acquisition ou de réalisation.

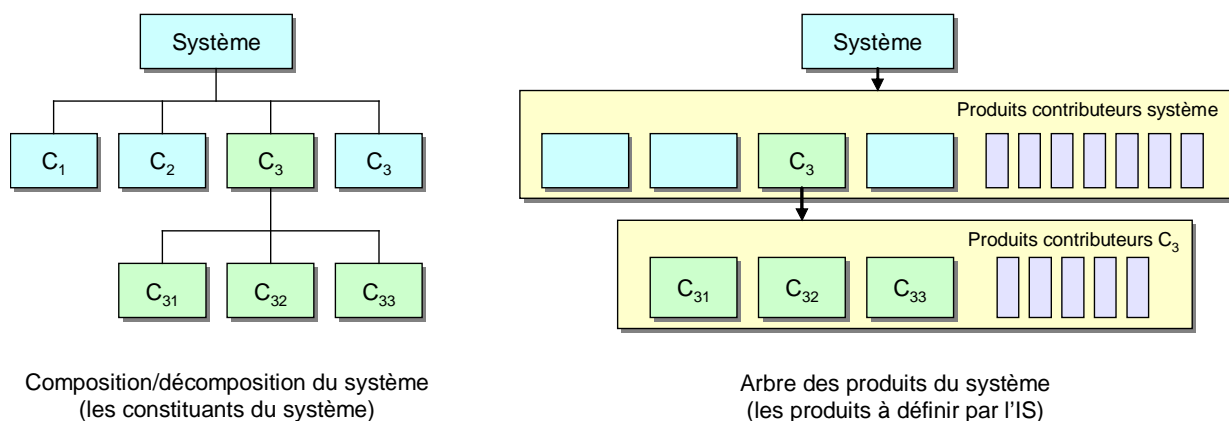


Figure 37 : Décomposition physique du système et arbre produit

On obtient ainsi, face à la décomposition physique du système en constituants, la structure arborescente des produits du système dite **arbre produit** formée de « blocs constitutifs » (building blocks) impliquant chacun la spécification des produits dont il est composé, celle des produits contributeurs à son cycle de vie et celles de leurs interfaces (voir Figure 37 et Figure 46).

Cet arbre est à la base de la structuration de la configuration du système : les éléments de configuration auxquels sont attachées les données sont les éléments de cet arbre que l'on a décidé de gérer en configuration (voir partie 4 : 13.2.2). Il est également utile à l'identification des tâches techniques du projet : tout produit de cet arbre doit être spécifié, conçu, obtenu (acquis, réalisé ou intégré), vérifié... (voir partie 4, 14.3.1.3.1).

8.1.3 Allocation des exigences et traçabilité

Au cours de la décomposition, les exigences système sont allouées aux éléments de la décomposition. Ainsi obtient-on pour chaque constituant (fonctionnel ou physique) des exigences quelquefois appelées exigences dérivées, par allocation-répartition des exigences du niveau supérieur (voir Figure 38).

Ainsi, une exigence de temps de réponse est répartie de manière additive sur les éléments de la chaîne fonctionnelle réalisant la fonction (les temps de réponse s'additionnent si les fonctions sont réalisées séquentiellement), tandis qu'une exigence de fiabilité est répartie de manière multiplicative (la fiabilité de la chaîne étant le produit des fiabilités des éléments).

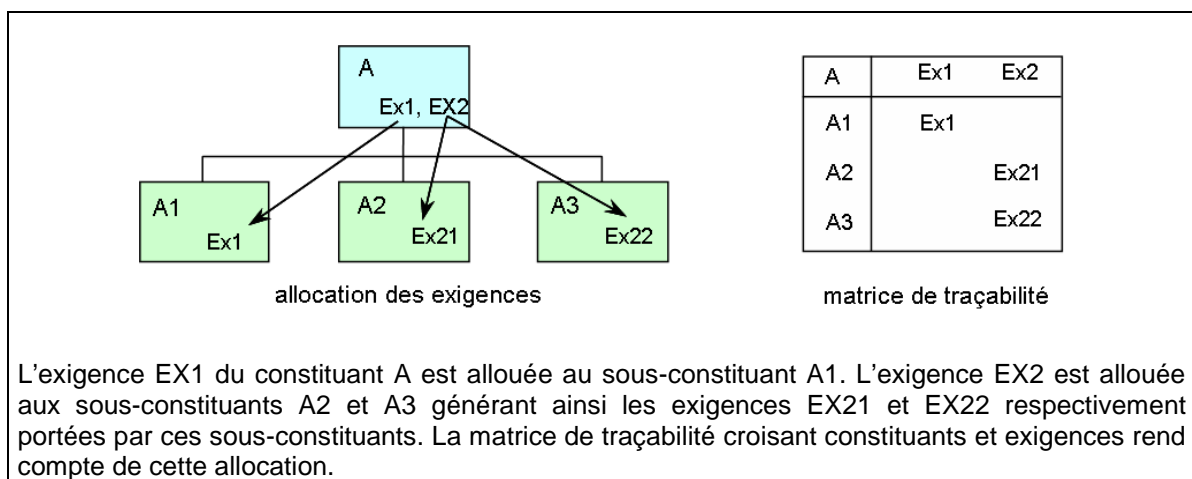


Figure 38 : Principe de décomposition et allocation des exigences

Dans le principe :

- ☐ Lors de son allocation à un ou plusieurs constituants, l'exigence de niveau supérieur n'est pas modifiée, mais passe de l'état « non allouée » à l'état « allouée ». L'allocation génère, par déclinaison et/ou répartition, des exigences dites **exigences dérivées** sur les constituants.
- ☐ Les exigences système, qui traduisent ce que doit faire le système et avec quels niveaux d'exigence (exemple : temps de réponse, sûreté de fonctionnement des fonctions), sont allouées (réparties sur) aux fonctions et sous-fonctions au cours de la décomposition fonctionnelle. Elles seront transitivement allouées aux organes lors de la projection fonctions sur organes.
- ☐ Les exigences quelquefois dites non fonctionnelles qui traduisent des contraintes non attribuables aux fonctions, sont directement allouées aux organes concernés.
- ☐ De nouvelles exigences sont **induites** par les choix techniques (architecture, technologie...). Elles peuvent avoir des impacts sur d'autres éléments du système et donc remonter dans l'arborescence des référentiels d'exigences. Ceci peut générer des boucles dans le processus de décomposition-allocation.

- ❑ *In fine*, les constituants et produits du système sont décrits par leurs « **exigences spécifiées** » : leurs caractéristiques techniques ainsi que leurs exigences de fabrication ou intégration, de vérification, de maintenance, de recyclage en fin de vie, etc.

La Figure 32 illustre ces différents types d'exigences (allouées, dérivées, induites, spécifiées, etc). Notons toutefois que ce sont toutes des exigences et que c'est à travers leurs attributs et leurs liens de traçabilité que leur état particulier est défini.

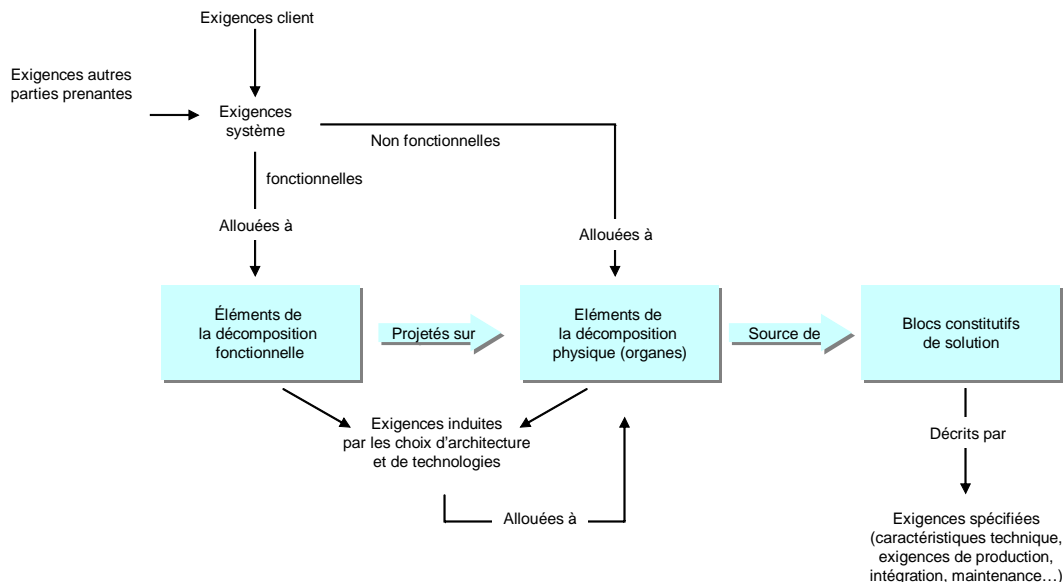


Figure 39 : Principe d'allocation des exigences (inspiré de la norme EIA 632)

La **traçabilité** des exigences se traduit sous forme de **matrices de traçabilité** :

exigences -> fonctions, fonctions -> constituants organiques, exigences -> constituants organiques

Ces matrices permettent de :

- ❑ Retrouver toutes les exigences dérivées d'une exigence amont et donc de répondre à des questions telles que : quels sont les impacts d'une modification d'exigence sur les éléments du système ?
- ❑ Remonter aux origines des exigences caractérisant les constituants et donc répondre à des questions telles que : quelles exigences sont mises en causes par la non tenue d'une caractéristique technique d'un constituant ?
- ❑ Identifier les manques et répondre à des questions telles que : le système présente-t-il des exigences qui n'ont pas été allouées à des constituants organiques ou, inversement, existe-t-il des exigences induites par les constituants organiques, non prises en compte au niveau système ?

De manière générale, la traçabilité enregistre l'historique des choix effectués et permet donc de répondre à des questions telles que :

- ❑ Quand a été prise telle décision d'allocation et pourquoi ?
- ❑ Quand a été prise telle décision modificatrice, pourquoi et par qui ?

Chaque exigence doit être vérifiable. On lui associe donc la ou les méthodes de vérification grâce auxquelles on pourra s'assurer que le constituant est conforme à son exigence. C'est l'objet des matrices de vérification.

L'allocation des exigences est un problème de conception

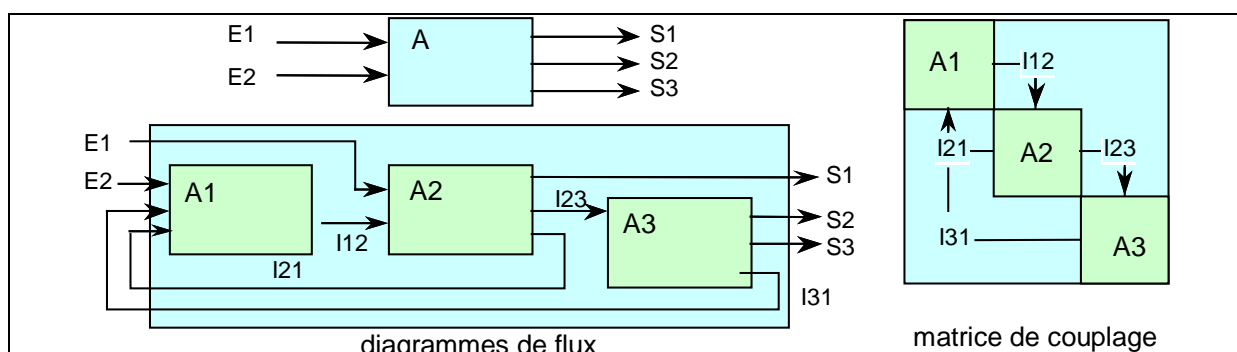
Dans la pratique, l'allocation des exigences n'a rien d'automatique et ne peut être faite a priori. Elle résulte de choix de conception impliquant les capacités technologiques, les architectures, les problèmes d'implantation, etc. En voici des exemples :

- ❑ Une exigence est généralement transformée par les choix de conception qui permettent la déclinaison des fonctions. Par exemple, une fonction du type « détecter des éléments présents sur une zone d'intérêt », avec des exigences liées aux types d'éléments à détecter (type, fixe ou en mouvement), d'autres liées aux caractéristiques de la zone (milieu, dimensions,...), etc, va se transformer lors de l'allocation en des ensembles d'exigences (plages de fréquences à détecter, portée de détection, des précisions de localisation, etc) différents selon le principe retenu pour réaliser la sous-fonction (recueil d'indiscrétions électro-magnétiques, émetteurs radars, réseaux de communication).
- ❑ La répartition optimale d'une exigence de temps de réponse sur la chaîne fonctionnelle qui y contribue ne peut être faite sans connaître les possibilités et coûts des technologies potentiellement utilisables pour chaque élément de la chaîne, et sans évaluer des alternatives architecturales (technologie à haute performance versus technologie courante avec introduction de redondances et fonctionnement en parallèle par exemple).
- ❑ L'allocation des exigences de tenue aux conditions d'ambiances tels que niveaux et chocs thermiques, chocs et vibrations mécaniques, interactions électromagnétiques, etc, est très dépendante des technologies utilisées. Ces dernières peuvent être génératrices d'ambiances éventuellement néfastes pour d'autres éléments du système ou nécessitant des protections particulières (confinement, ventilation...), susceptibles de générer des exigences induites. En conséquence, l'allocation de telles exigences doit également tenir compte de l'architecture et de l'implantation physique. Enfin, la vérification de telles exigences sur chaque constituant est souvent économiquement insupportable, on ne peut multiplier les simulateurs d'environnement.

Les processus de décomposition/allocation et d'élaboration de solution sont donc totalement imbriqués dans la pratique et réclament une approche d'ingénierie multidisciplinaire

8.1.4 Interfaces

Lors de toute décomposition, fonctionnelle ou organique, les interactions entre éléments résultant de la décomposition sont identifiées, ce qui génèrera des interfaces dans les architectures.



Dans la décomposition fonctionnelle de A en A1, A2 et A3, les interactions de A avec son environnement (flux E1 et E2 en entrée et flux S1, S2 et S3 en sortie) sont évidemment conservées, tandis que des interactions internes sont générées (interactions de propagation de flux I12 et I13 et interactions de rétroaction I21). La matrice de couplage croisant toute sous-fonction avec toute sous-fonction rend compte des interactions de propagation au dessus de la diagonale et des interactions de rétroaction en dessous de la diagonale.

Figure 40 : Principe de décomposition et d'identification des interactions

Dans la décomposition fonctionnelle, les interactions fonctionnelles (celles que l'on recherche pour reconstituer les fonctions de service à partir de leurs sous-fonctions) sont dûment identifiées en termes de flux échangés entre les sous-fonctions et de caractéristiques de ces échanges (voir Figure 40). Les diagrammes de flux et matrices de couplage représentent les flux d'interactions échangés entre les sous-fonctions (les flux orientés allant de l'élément Am à l'élément An sont notées Imn).

Les **interfaces physiques** apparaissent lorsque des éléments fonctionnels en interaction sont alloués à des constituants physiques différents (Figure 41). Elles peuvent nécessiter des fonctions d'interface (fonctions d'adaptation entre les constituants telles que lubrification en interface mécanique, adaptation sémantique et syntaxique en interface informationnelle).

On notera ainsi qu'une interface vue comme frontière entre constituants à un certain niveau de granularité peut être vue, au fil de la décomposition, comme un sous-système lui-même complexe. Les « middleware » (bus d'intégration applicatives et bus logiciels) ainsi que les réseaux informatiques en sont des exemples.

L'interface se décompose :

- ☐ en fonctions d'interfaces nécessaires aux échanges et assurant les transformations de flux nécessaires (qui doivent être allouées à l'un des constituants interfacés ou aux deux, soit à un nouveau constituant),
- ☐ et en médium ou lien d'interface support du transfert de flux (qui peut être lui-même un constituant). Le lien d'interface peut être commun à plusieurs interactions échangeant des flux de même nature (exemple des bus électroniques)

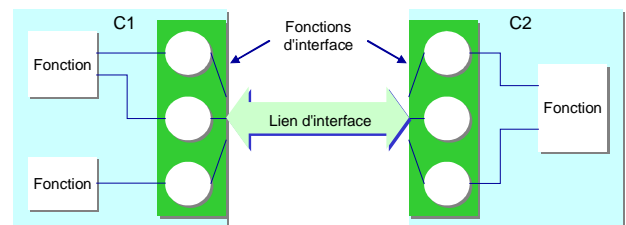


Figure 41 : Structure d'interface

La spécification préalable des interfaces paraît être une condition sine qua non pour paralléliser les développements des constituants.

Remarques :

Dans le principe il faudrait avoir spécifié les interfaces au niveau physique avant de sous-traiter les constituants interfacés à des équipes différentes. Ceci n'est pas toujours souhaitable : la recherche d'une solution globalement optimisée nécessite souvent, pour définir l'interface, la mise en place d'un protocole de collaboration entre les trois acteurs : les responsables des constituants interfacés et le responsable du constituant de rang supérieur.

Les constituants qui interagissent avec les systèmes de l'environnement présentent des interfaces dites externes. Celles-ci peuvent relever du besoin et sont par principe spécifiées dans le cahier des charges. Elles peuvent également résulter de choix de conception, lorsque l'on décide de satisfaire des fonctions ou exigences systèmes par l'utilisation de systèmes externes existants.. Les constituants du système doivent y être adaptés. En cas d'évolutivité prévisibles des interfaces externes, on utilise des techniques dites d'encapsulation, permettant l'évolution indépendante des constituants du système et des systèmes de l'environnement.

Les **matrices de couplage** (ou matrices N^2 ou encore matrices de dépendances) représentent l'ensemble des couplages (interactions, interfaces) entre éléments (fonctionnels ou organiques) d'un système. Cette représentation de l'architecture est utile pour répertorier et suivre la maturité de l'ensemble des interfaces. Elles sont utilisées

- ☐ en architecture pour regrouper des éléments en modules et définir des métriques de couplage. Ces métriques permettent d'évaluer la modularité, par exemple à partir des rapports de cohérence (nombre de couplages internes réels sur nombre de couplages internes possibles) et de couplages externes (nombre de couplages externes réels sur nombre de couplages externes possibles) des différents constituants,

- en intégration pour mettre en évidence les éléments qui seront couplés sur chaque interface et pour analyser les scénarios mettant en jeu plusieurs éléments en interaction.

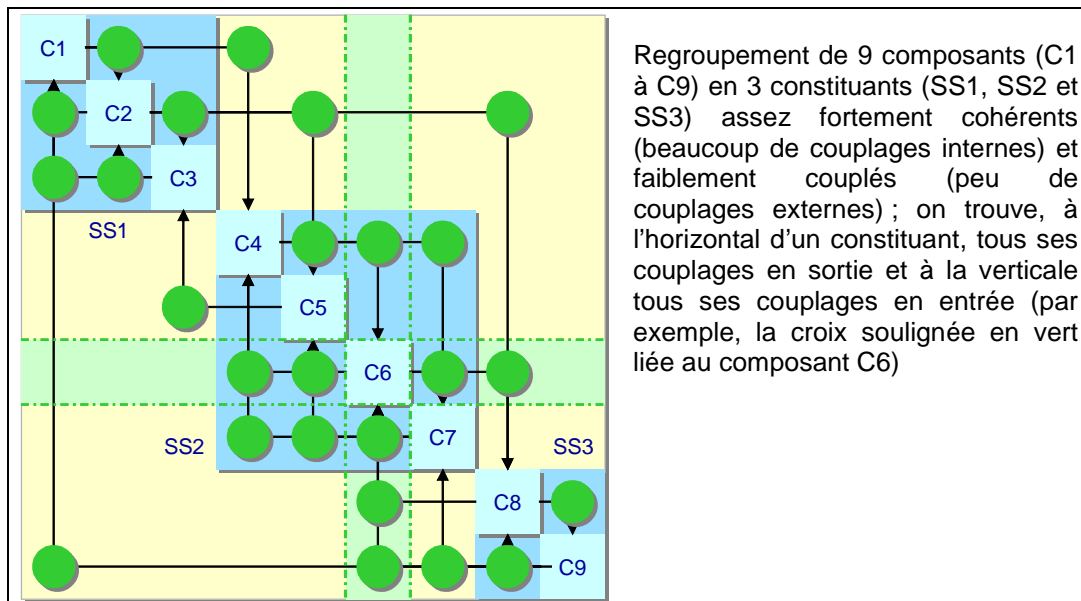


Figure 42 : Matrices de couplage

Remarque 1. Des interactions non intentionnelles peuvent apparaître entre constituants (phénomènes d'interférence électromagnétique ou thermique, de résonance, effet de la modification de l'équilibre dynamique d'ensemble due à la modification de la masse d'un constituant, interblocages en informatique) pour lesquels les interfaces ne sont pas toujours identifiables.

De manière générale, on cherche à identifier les propriétés émergentes correspondantes de manière à les maintenir dans des limites acceptables si elles peuvent être nuisibles, à les utiliser si elles peuvent être fécondes (c'est une des directions de l'évolution des systèmes de systèmes où de nouvelles possibilités d'utilisation sont découvertes au cours de leur exploitation et mises en œuvre moyennant généralement quelques adaptations).

Remarque 2. Les interfaces techniques issues de la décomposition et de l'architecture système induisent des interfaces organisationnelles dans l'architecture industrielle du projet, dès lors que la définition des constituants interfacés sont attribués à des équipes différentes. Mais l'inverse peut aussi se produire : en raison d'impératifs d'ordre supérieur (règles de coopération étatiques ou industrielles, sauvegarde d'intérêts stratégiques, répartition a priori du chiffre d'affaires, etc.), l'architecture industrielle peut être définie indépendamment des considérations fonctionnelles et techniques et, par là même contraindre l'architecture technique.

Toute différence de logique entre les deux architectures technique et industrielle entraîne mécaniquement de la complication dans le réseau d'interfaces organisationnelles ne serait-ce que par la multiplication de sous-traitances croisées qu'elle est susceptible de générer.

8.1.5 Critère d'arrêt des décompositions

Dans le principe, l'approche de décomposition s'arrête lorsque l'on arrive à des constituants qu'il n'est plus utile de décomposer :

- soit parce qu'on trouve dans l'entreprise (produits maisons) ou sur le marché (COTS, *components on the shelves*, composants sur étagères) un produit répondant au besoin,
- soit qu'il existe, dans le contexte industriel du projet, une entité apte à le développer, par exemple lorsque il ne relève que d'un seul métier.

L'utilisation d'un produit existant (un COTS) implique une opération d'adéquation ayant pour but de vérifier que les exigences allouées au constituant sont vérifiées du fait des caractéristiques techniques du COTS, et de définir les adaptations de conformité ou d'interfaçage nécessaires, en prenant en compte les éventualités d'évolution de définition du COTS au cours de la vie du système.

8.2 Le système a une architecture

L'**architecture** est un modèle constructif du système définissant son organisation (ses éléments et leurs interfaces) ainsi que les principes régissant sa conception et son évolution. L'architecture peut être représentée selon différents points de vue. Elle peut être logique (fonctionnelle) ou physique. Elle peut se représenter à différents niveaux d'abstraction ou de granularité.

Par principe, les constituants de l'architecture sont les feuilles de l'arborescence système (fonctionnelle ou physique) arrêtée à un certain niveau de décomposition. Sa représentation est complétée par la modélisation de son fonctionnement : scénarios d'interaction entre ses constituants logiques ou physiques. Dans le principe, l'architecture logique (fonctionnelle) fait abstraction des choix physiques et est donc plus générique que l'architecture physique.

Au delà des purs besoins de conception où les architectures se représentent selon divers points de vue traditionnels : structure, comportement, on décline des représentations selon des points de vue propres aux différentes disciplines : fiabilité, sûreté de fonctionnement, sécurité, puis des vues spécifiques pour les métiers de réalisation : par exemple : games d'assemblage, plans de câblage.

8.2.1 Architecture logique (ou fonctionnelle)

C'est une description du système sous forme d'un arrangement de fonctions, de leurs sous-fonctions ainsi que de leurs interactions. Cet arrangement définit la logique d'organisation des fonctions et sous-fonctions, avec mise en évidence des sous fonctions communes, la logique d'enchaînement des fonctions, les conditions sur les flux qu'elles transforment et sur les flux qui les contrôlent (déclenchement, régulation), ainsi que les niveaux d'exigence des fonctions requis pour répondre au référentiel des exigences.

Pourquoi et comment représenter une architecture ?

Représenter une architecture a pour objectif de donner à chaque utilisateur de cette représentation la vision adaptée à ses domaines d'intérêts et de compétences en garantissant la cohérence des visions présentées, leur exhaustivité et l'unicité de l'architecture du système représentée.

La norme ISO/IEC 42010, issue du standard IEEE1471, définit les relations qui doivent relier l'architecture du système à logiciel prépondérant à ses représentations, selon les principes illustrés sur la figure suivante.

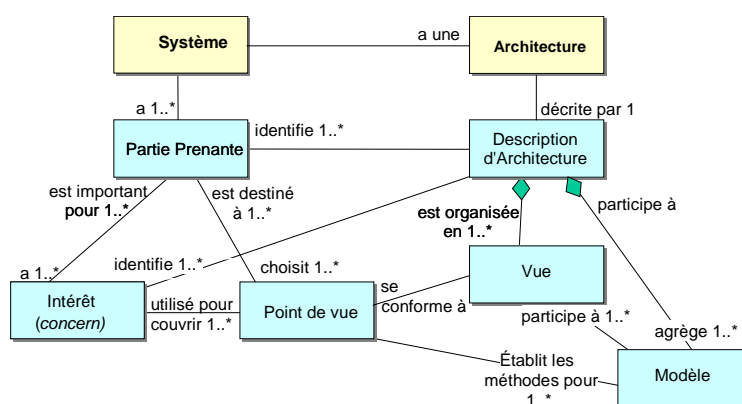


Figure 43 : Relations guidant les choix de représentation d'une architecture

Le diagramme montre qu'une architecture est représentée par une description d'architecture. Cette représentation est constituée de vues identifiées et construites à partir des points de vue à adopter pour répondre aux attentes de toutes les parties prenantes impliquées ou concernées par le système.

A titre d'exemple on peut identifier les visions des grands types de parties prenantes suivantes :

- ☐ L'acquéreur, qui veut avoir une vision adaptée au processus d'acquisition qu'il pilote (ce qu'il acquiert, selon quelle logique, quelles sont les implications de l'architecture pour le cycle de vie du système, pour son exploitabilité, sa maintenabilité...).
- ☐ L'opérateur exploitant, qui a besoin de connaître comment le système se déploie, comment il se pilote, comment il fonctionne, comment il se maintient ...
- ☐ L'utilisateur, qui veut savoir comment utiliser le système (les services qu'il offre) et les interactions qu'il peut avoir avec le système.
- ☐ Le producteur, qui a besoin de disposer de modèles représentatifs du système et des constituants à produire.
- ☐ Le concepteur, pour toutes les « spécialités » concernées (fiabiliste, ergonome, spécialiste du soutien) ou son « métier » (mécanicien, électronicien, automaticien..).

Ce chapitre et le chapitre 3 de la partie 4 présentent les principaux modèles utilisés en IS pour représenter les différents aspects de l'architecture d'un système.

Les concepts d'architecture logique et d'architecture fonctionnelle sont souvent considérés comme synonymes. Certains les différencient : dans l'**architecture fonctionnelle**, l'élément constitutif est la fonction (sous-fonction, groupe de sous-fonctions directement issus de la décomposition fonctionnelle), dans l'**architecture logique**, il est le "**constituant logique**" ou **module fonctionnel** qui peut regrouper plusieurs fonctions de façon cohérente (regroupements logiques, schémas architecturaux préexistants, objets au sens des informaticiens...).

L'architecture logique est conçue et représentée selon deux approches complémentaires, structurelle et comportementale :

- ☐ Dans l'approche structurelle, il s'agit de définir des regroupements de fonctions avec leur logique d'interactions incluant des optimisations, par exemple l'identification de sous-fonctions communes à différentes fonctions en estimant les risques de cette mise en commun ou encore les regroupements de fonctions critiques afin de limiter les modules soumis à certification. L'architecture est représentée en termes structurels sous forme d'un agencement de modules fonctionnels reliés par les flux qu'ils transforment et échangent.
- ☐ Dans l'approche comportementale, il s'agit de prendre en compte les aspects comportementaux de l'enchaînement des sous-fonctions ou modules) ainsi que de pilotage associé. L'architecture est décrite en termes d'enchaînements fonctionnels dans les différents modes de fonctionnement (pour les différentes conditions d'emploi et de vie du système).

Représentations structurelle et comportementale de l'architecture logique

Dans l'**approche structurelle**, l'architecture est représentée par un arrangement de fonctions (ou de modules logiques regroupant des sous-fonctions) éventuellement mis en facteurs qui s'échangent des flux (matière, énergie, information). On distingue les flux (physiques ou informationnels) transformés par les modules et les flux (généralement informationnels) pilotant cette transformation : les fonctions doivent être déclenchées et régulées.

Les diagrammes de flux (dits diagrammes de flux de données, DFD, *Data Flow Diagrams*) représentant les composants logiques opérants et les flux qu'ils s'échangent, constituent la représentation traditionnelle de l'architecture logique au sens structurel.

Ils sont complétés par les flux liés au pilotage : flux de données de régulation et flux dits de commande (de contrôle), notamment déclencheurs d'activités (diagrammes de flux de commande, CFD, *Control Flow Diagrams*). Ces flux sont issus de l'approche comportementale.

Cette représentation se construit à différents niveaux de granularité de la décomposition structurelle du système (à chaque niveau elle montre l'arrangement des feuilles de l'arborescence et les flux d'interaction qui les relient).

Dans l'**approche comportementale** (temporelle, dynamique), le fonctionnement du système est représenté sous forme d'enchaînement - parallélisation des éléments logiques feuilles de la décomposition structurelle. Les diagrammes de flux de fonctions ou d'enchaînement fonctionnel (FFBD, *Functional Flow Block Diagrams*) représentant les enchaînements fonctionnels avec alternatives (OU), parallélisme (ET) et répétition (boucle) en constituent une des nombreuses représentations possibles.

Cette représentation se construit à différents niveaux de la décomposition temporelle : enchaînement des phases de vie, des modes de fonctionnement, des activités des processus de fonctionnement.

Ces représentations qui mettent en évidence l'aspect discontinu du comportement du système (changement de phase de vie, de mode de fonctionnement, d'état de fonctionnement) permettent de définir les flux de contrôle. Ils sont éventuellement complétés par des représentations analytiques du fonctionnement dans les différents états (par exemple sous forme de systèmes d'équations aux dérivées partielles).

A titre d'exemple simple, la Figure 43 propose des représentations fonctionnelles très schématiques du processus principal d'une machine à laver le linge domestique sous trois aspects :

- ☐ Décomposition fonctionnelle (du processus de lavage)

- ❑ Représentation structurelle de l'architecture logique du système opérant sous forme de diagramme de flux. On note la mise en facteur des sous-fonctions (une seule fonction agiter), l'adjonction de la fonction technique contenir. Les flux de contrôle issus du ou allant vers la fonction de pilotage (déclenchement des fonctions, données de régulation, données ou événements externes ou issus du processus) n'ont pas été représentés.
- ❑ Représentation comportementale : représentation de l'enchaînement des fonctions.

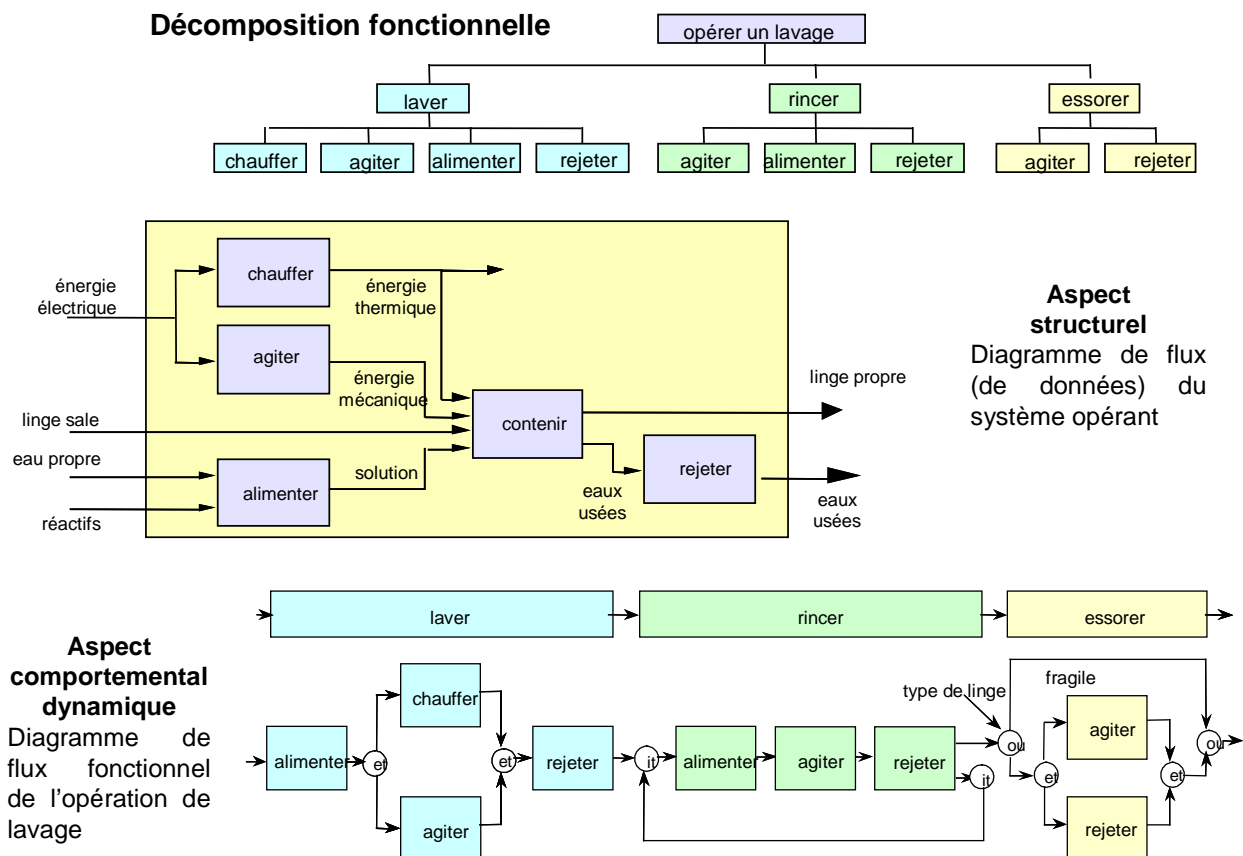


Figure 43 : Trois aspects d'une machine à laver le linge vue au niveau fonctionnel

8.2.2 Architecture physique

8.2.2.1 Aspects de l'architecture physique

L'architecture physique est un agencement d'éléments physiques interfacés entre eux qui définit une solution conçue (ou envisageable) pour satisfaire à l'architecture logique (fonctionnelle) et au référentiel des exigences.

Elle est obtenue par la projection des modules fonctionnels de l'architecture logique sur des constituants aptes à en assurer les exigences tout en répondant à l'ensemble des exigences. Les exigences fonctionnelles portées par les fonctions se retrouvent, par transitivité, allouées aux constituants. Les autres exigences sont directement allouées aux constituants physiques.

La projection de modules fonctionnels présentant des interactions, sur des constituants différents, génère des interfaces dites **interfaces internes** (voir Figure 44 et chapitre 8.1.4) dont les éléments (fonctions et médium ou lien d'interface) doivent également être attribués à des constituants (constituants interfacés ou constituants spécifiques d'interfaçage).

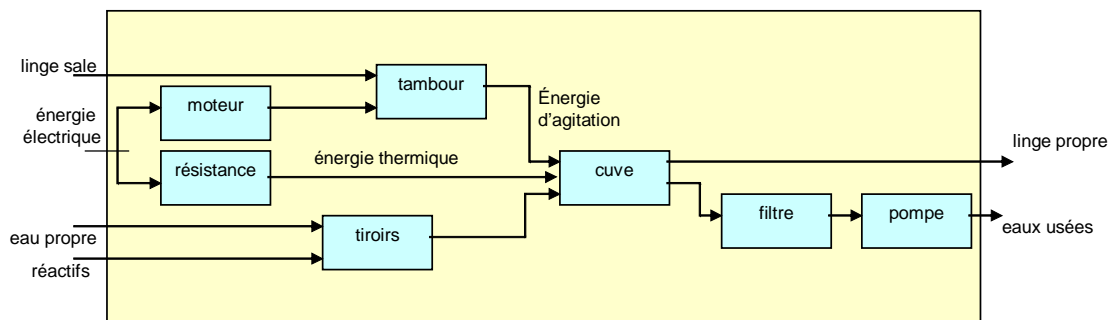


Figure 44 : Architecture physique de la machine à laver le linge

A titre d'exemple, la Figure 44 propose une représentation possible de l'architecture physique de la machine à laver le linge dont l'architecture fonctionnelle est représentée Figure 43. On y constate :

- ❑ l'aspect non biunivoque de la projection fonctions sur organes : la fonction agiter se projette sur le moteur qui meut le tambour et sur ce dernier qui agit le linge dans la cuve ; la fonction contenir se projette sur le tambour qui contient le linge et la cuve qui contient les solutions liquides...
- ❑ le besoin de fonctions/organes techniques : la pompe nécessite un organe de filtrage en entrée,
- ❑ le besoin d'interfaces entre constituants pour toute interaction :
 - interfaces externes : vanne pour l'arrivée d'eau, alimentation électrique, porte pour enfourner le linge...
 - interfaces internes : interface mécanique de transmission de couple entre moteur et tambour, interface de rotation entre tambour et cuve...

Les organes doivent être pilotés. C'est le rôle du système de commande (le programmeur pour la machine à laver) qui génère les commandes discontinues telles que les déclenchements de fonctions d'une part et les commandes de régulation d'autre part..

8.2.2.2 Conception physique, évaluations, optimisation

La conception d'architecture physique est conduite en conformité à l'architecture logique qui porte déjà l'ensemble des exigences fonctionnelles et aux autres exigences systèmes.

Cette conception est guidée :

- ❑ Par des logiques de choix de conception, pouvant intégrer des choix relevant :
 - de schémas architecturaux préexistants,
 - de l'application de principes architecturaux et de contingences diverses tels que :
 - maîtrise (minimisation) des interfaces tant en nombre (modules fortement cohérents et faiblement couplés ce qui facilite la factorisation et limite les dépendances, voir Figure 42), qu'en variétés (standards de bus, architectures pivots) et complexité intrinsèque,
 - ouverture, extensibilité, évolutivité... recherche de la robustesse du réseau d'interfaces permettant les évolutions par modification de constituants sans modification d'architecture, voire par intégration de nouveaux constituants (adaptation à de nouvelles exigences, ou gain de performances par exploitation d'une technologie arrivée à maturité),
 - capacité de dissociation des fonctions fortement évolutives,
 - distinction des éléments critiques soumis à certification, (éviter d'avoir à certifier des éléments non critiques du fait de leur association avec des éléments critiques),
 - modularité afin d'assurer que l'architecture permette de s'adapter, de manière optimale, à des contextes d'emploi variés,

- et de façon plus générale par les exigences non fonctionnelles qui ne seraient déjà prises en compte dans les éléments précédents (coûts, productibilité/fabricabilité, maintenabilité, testabilité, ambiances, normes, standards et réglementation, ...).

❑ **Par la prise en compte de contraintes et opportunités techniques diverses, telles que :**

- possible utilisation de composants préexistants (COTS), en vérifiant leur adéquation, notamment leur conformité aux exigences, en faisant les éventuelles adaptations architecturales nécessaires et en les encapsulant de manière à profiter de leurs évolutions ultérieures sans remise en cause de l'architecture. On note que le choix de tels composants (offrant parfois plus de fonctions que celles utilisées dans l'architecture du système) peut induire des risques de comportements non voulus ou non maîtrisés,
- utilisation de standards d'interfaces, ou de standards de constituants physiques,
- prise en compte des disponibilités de technologies :
 - intégration de technologies suffisamment matures,
 - dissociation des composants à obsolescence rapide,
- accessibilité des pièces d'usure pour les rechanges, des éléments de sécurité à inspecter fréquemment.

❑ **Par la prise en compte de contingences contextuelles (projet, stratégie d'entreprise), telles que :**

- compatibilité avec l'organisation industrielle afin de limiter les interfaces organisationnelles,
- capacités de l'organisation industrielle en termes de développement et de production et de maintien en condition opérationnelle,
- contraintes d'appartenance à une ligne de produits.

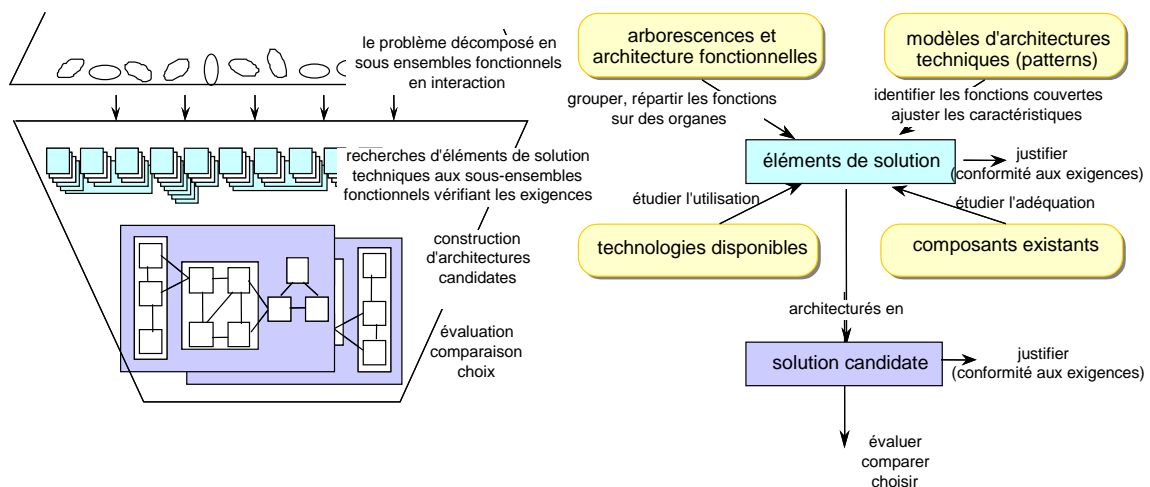


Figure 45 : Recherche de solutions architecturales

Ceci étant, de multiples possibilités techniques se dessinent, tant au niveau des constituants (choix de technologies, choix entre acquérir, réutiliser et développer), qu'au niveau de leur arrangement (d'autant plus que, bien évidemment, l'optimum global n'est généralement pas la somme des optima locaux).

Faute de savoir construire directement une solution optimale, on est conduit à rechercher les meilleurs compromis en évaluant et comparant plusieurs architectures techniques candidates dans une approche pluridisciplinaire de manière à prendre en compte tous les impacts de chaque solution sur le système et son environnement pendant tout le cycle de vie en analysant leurs risques respectifs (voir partie 4, paragraphe 13.4).

Les solutions sont comparées dans une approche de comparaison multicritère en fonction d'un modèle décisionnel hiérarchisant les critères. Les choix et compromis sont justifiés.

8.2.3 La définition du système

Il s'agit maintenant de construire le dossier de définition (DD) du système qui fournit toutes les informations nécessaires à la réalisation du système et à son maintien en condition opérationnelle.

Il se présente sous la forme d'une arborescence de spécification des produits (exigences spécifiées des produits) soit constituants du système étudié soit produits contributeurs nécessaires à leur cycle de vie (la Figure 46 présente l'arbre-type des produits à spécifier).

La conception architecturale (dite également conception préliminaire) débouche sur la spécification des exigences des constituants ou produits contributeurs de différents niveaux de décomposition et, *in fine*, sur les exigences allouées aux composants à acquérir ou développer, qui sont les feuilles de l'arborescence.

La conception détaillée débouche sur les exigences dites spécifiées de ces composants (permettant de les réaliser ou de les acquérir). Des bouclages entre conception détaillée et conception architecturale permettent les ajustements nécessaires ou opportuns (optimisation). La V et V du dossier de définition a pour but de s'assurer de la cohérence de la définition et de sa conformité aux exigences système.

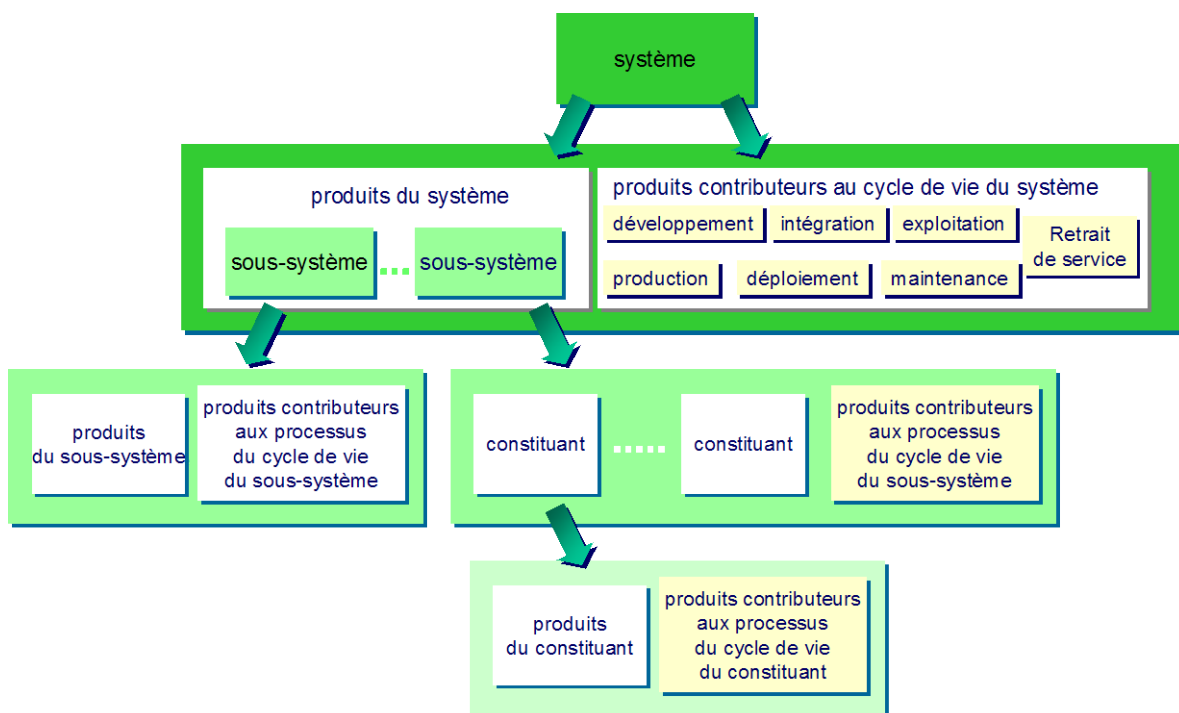


Figure 46 : Arbre produit, base pour l'arborescence de spécifications (source : normes IEEE 1220, EIA632 et ISO15288)

Le dossier de définition (DD) tient compte des contraintes contractuelles et industrielles et fournit toutes les informations nécessaires pour :

- ☐ réaliser ou acquérir et valider les composants,
- ☐ intégrer les constituants à partir de leurs composants ou sous-constituants, les vérifier et les valider,
- ☐ intégrer le système à partir de ses sous-systèmes, le vérifier et le valider,
- ☐ réaliser ou acquérir les produits contributeurs,

- ☐ utiliser le système,
- ☐ maintenir le système en condition opérationnelle.

Dans le cas des systèmes à produire en série ou de constituants multiples d'un système unique, le dossier de définition est complété, après les études d'industrialisation, par le dossier industriel (DI) ou dossier d'approvisionnement, fabrication et contrôle (DAFC) qui définit le processus de production et les outils associés (dont l'adaptation des systèmes de production existants).

L'ingénierie simultanée (ou ingénierie concourante) consiste à définir simultanément le produit et son industrialisation afin de minimiser le « time to market ».

Dans le cas des lignes de produits, le dossier de définition et le dossier d'industrialisation doivent prendre en compte l'ensemble des variantes

Le domaine de l'industrialisation est très lié aux génies associés aux différents métiers (ce que fait, par exemple, le bureau des méthodes pour la fabrication mécanique). Le travail d'industrialisation, au même titre que pour la conception détaillée, est suivi par l'ingénierie pour vérifier la conformité à la définition et traiter d'éventuels ajustements, notamment d'optimisation.

Economie de la conception

En synthèse de ce chapitre lié à la conception de la solution, rappelons quelques éléments fondamentaux

- ☐ La conception proprement dite s'apparente à de la résolution de problème : définir une solution à un problème (éventuellement évolutif) exprimé sous forme des exigences initiales ou exigences systèmes qui soit globalement optimisée par rapport aux opportunités et contraintes du domaine des choix possibles, ceci de manière équilibrée sur la vie du système : conception, vérification, production, exploitation et soutien, retrait.
- ☐ Elle résulte de deux approches complémentaires fortement imbriquées :
 - approche analytique dans le domaine du besoin : décomposition du système prescrit par ses exigences système, guidée pour l'essentiel par les aspects fonctionnels avec allocation des exigences fonctionnelles aux constituants logiques de la décomposition
 - approche constructive dans le domaine de la solution : (re)composition sous forme d'une architecture conforme aux exigences, avec la définition de ses constituants, de leurs interactions (interfaces) et des processus et systèmes contributeurs associés aux constituants pour leur vérification, leur production, leur maintien en condition opérationnelle, leur retrait de service), tout particulièrement guidée par les exigences non fonctionnelles et les opportunités et contraintes issues du domaine des choix possibles.
- ☐ Elle repose sur une démarche par nature itérative : l'approche de décomposition correspond à une démarche d'affinages successifs portant sur les constituants de différents niveaux de la décomposition : le système, ses sous-systèmes, leurs constituants, leurs sous-constituants, etc.
 - Ceci conduit à itérer le processus de conception sur ces différents niveaux
 - Cette itération peut introduire des rétroactions sur les processus de niveau(x) supérieur(x) susceptibles d'impliquer des reprises de ces processus : impasse technologique, recherche d'optimisation, exigences induites par des choix techniques impactant les niveaux supérieurs...
- ☐ Si les itérations pour affinement sont inhérentes à la conception, les rétroactions sur des éléments déjà conçus peuvent être pénalisantes. On cherche à les minimiser par l'analyse pluridisciplinaire des impacts des choix successifs, visant ainsi à anticiper les problèmes des niveaux inférieurs et spécifier chaque niveau de manière globalement optimisée autant que faire se peut du premier coup, quitte à prévoir des marges pour absorber les évolutions et problèmes potentiels. L'équipe d'ingénierie intégrée regroupant les disciplines concernées et travaillant en « plateau » répond à cet objectif.
- ☐ Les résultats de conception enrichissent les référentiels au fur et à mesure.
 - Les activités de vérification et validation, portant sur des vérifications de conformité aux référentiels

amonts, assurent que les activités de conception sont bien faites (n'introduisent pas d'erreur) et que la définition du système répond à son objectif (elle est conforme aux exigences système).

- Les analyses évaluant et comparant les solutions alternatives assurent que les choix successifs tendent vers une solution optimisée.
- Les Activités de V & V ainsi que les activités d'évaluation-comparaison tendent à s'assurer que l'on conçoit bien du premier coup et limitent les risques de retours sur des activités déjà réalisées.
- A noter qu'une solution alternative écartée peut devenir une opportunité de solution rapidement disponible, lorsqu'en cours de développement la solution optimisée retenue s'avère poser un problème de faisabilité (validation, industrialisation, maintenabilité,...)

- ☐ La conception prépare les étapes suivantes et, en particulier, cherche à optimiser la phase d'intégration en définissant la stratégie d'intégration, vérification et validation.

8.3 Le système inclut des acteurs humains

8.3.1 Complémentarité entre composante humaine et composante technologique

Suivant l'angle de vue ou le degré de granularité, on peut regarder un système soit dans sa globalité en intégrant la composante humaine, soit dans sa seule composante technologique, l'opérateur humain étant considéré comme extérieur au système. (Cf. encart en partie 1 chapitre 2.2.1.2: L'homme et le système).

Dans les premiers temps, l'IS a été appliquée plutôt à la composante technologique, l'humain apparaissant dans les organisations externes d'utilisation, d'exploitation, de soutien. La prise en compte de l'humain s'est alors focalisé sur l'interaction entre l'opérateur humain et le système technologique, dans une recherche de la meilleure symbiose homme-machine. Ceci a conduit à passer progressivement d'une vision technique centrée sur l'efficacité de la machine servie par son opérateur, à une vision centrée sur l'humain, la machine étant spécifiée et conçue en regard de la logique de l'opérateur. C'est le domaine de l'**ergonomie** bio-mécanique, perceptuelle et psycho-cognitive des interactions homme-machine.

Mais beaucoup de nos systèmes et systèmes de systèmes apparaissent aujourd'hui comme des systèmes dits **socio-techniques** dans lesquels la composante organisationnelle prend une place importante, voire prépondérante. Ce que l'on cherche est bien évidemment l'optimisation du système global comprenant la composante humaine et la composante technique.

En voici des exemples : les systèmes intégrés de production combinant gestion industrielle et ateliers de production ; les services de transport public (qui incluent les systèmes de transport, de régulation, de service aux usagers et les organisations associées) ; les systèmes de crise où l'optimisation de l'action collective assistée par le système technologique est recherchée ; les systèmes de défense regroupant des unités avec leurs systèmes de commandement et leurs systèmes d'armes ; ou encore les systèmes orientés service, par exemple, les systèmes sous-jacents aux multiples services accessibles à travers un téléphone mobile.

Notons que ce même raisonnement s'applique également à l'ingénierie des systèmes technologiques, dans la mesure où l'on cherche à optimiser l'ensemble constitué par le système technologique et par les systèmes d'exploitation et de soutien (qui, par nature, sont de type majoritairement organisationnels).

La définition d'une organisation présente des analogies avec la conception d'une architecture technologique :

- ☐ prendre en compte les besoins et contraintes de toutes les parties prenantes,
- ☐ formaliser les objectifs, attentes et contraintes du problème (mettre au clair sous forme d'exigences ce qu'on attend de l'organisation),
- ☐ décomposer le problème sous forme des processus, activités et tâches à mettre en œuvre de manière coordonnée pour répondre aux exigences (problème d'analyse et conception fonctionnelle),

- ❑ projeter cette vision fonctionnelle sur une organisation d'entités organisationnelles en allouant les activités des processus aux entités et en définissant les rôles, les tâches, les interactions et les procédures des acteurs de ces entités pour répondre aux exigences... (problème d'architecture et d'allocation).

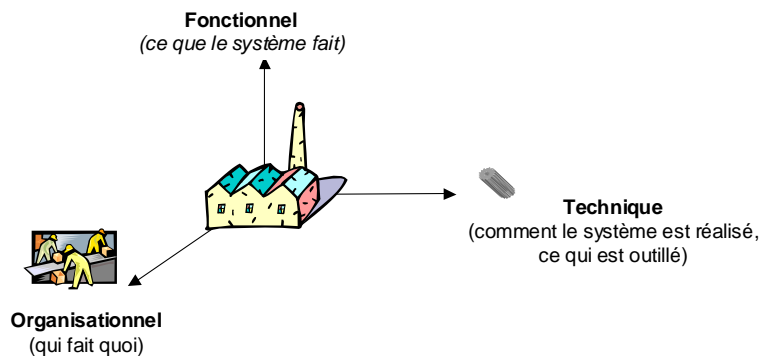
Cette analogie atteint cependant très rapidement ses limites : les systèmes sociologiques ont des capacités d'auto-adaptation, d'auto-organisation et d'autofinalisation inaccessibles aux systèmes techniques qui relèvent beaucoup plus modestement de la cybernétique en boucle fermée, et l'on voit mal comment l'ingénierie système conçue pour ceux-ci pourrait s'appliquer à ceux-là, par exemple à l'organisation d'une entreprise. Comment traiter de manière pertinente, avec les méthodes de l'IS, de la pérennité de l'entreprise, de sa recherche de croissance externe ou interne, des répartitions et conflits de pouvoir, du règlement de problèmes sociaux, etc ?

Pour la conception de nos systèmes techniques en boucle ouverte sur l'humain individuel et collectif, les techniques de l'ingénieur se sont progressivement complétées par celles de l'organisateur et de l'ergonome (communication, gestion des collectifs, travail en équipe, organisations virtuelles, etc) tenant compte des sciences psycho-physiologiques et psycho-sociales sous-jacentes. Ici encore, on est progressivement passé de visions centrées sur l'efficacité technique (approches tayloriennes par exemple) à des visions beaucoup plus centrées sur l'humain (avec l'assistance et la coopération des technologies de l'information).

Au-delà de cet aspect, on peut penser, bien que ce ne soit pas dans notre propos, que l'application des principes de l'IS pourrait apporter de la rigueur dans l'ingénierie et la ré-ingénierie des organisations complexes. A l'inverse, une meilleure connaissance des processus mis en jeu par l'humain en situation de travail individuel ou collectif, et au-delà une ouverture sur les méthodes d'organisation et les sciences psycho-sociales, pourrait accroître la pertinence des méthodes et outils de l'IS.

8.3.2 Introduction aux systèmes socio-techniques

La Figure 47 synthétise les dimensions que l'architecture d'un système socio-technique doit considérer : les dimensions fonctionnelle et technique (introduites dans les chapitres précédents) et la dimension organisationnelle.



terminaux nomades des services liés à la localisation sur la surface terrestre. Il a besoin d'une organisation pour l'opérer et l'administrer.

- ❑ On peut distinguer deux types d'apports fonctionnels de la dimension technique : des apports qui traitent majoritairement des flux physiques (matières, énergie), compléments musculaires à l'humain, des apports qui traitent majoritairement des flux informationnels, regroupés sous le terme de système automatisés de traitement d'information.

A titre d'exemple, la partie technique d'un système de production manufacturière comporte un outil de production (par exemple des ateliers (avec des machines de fabrication, d'assemblage, de manutentions, etc, ayant leurs propres systèmes informatiques de conduite sous le contrôle d'un système de supervision) et un système d'information outillant l'organisation administrative notamment pour réaliser le pilotage et la gestion industrielle (planification, approvisionnement, gestion des stocks, ordonnancement, lancement et suivi de production, etc). Outils de production et systèmes informatiques nécessitent d'être opérés et maintenus.

Les systèmes où l'aspect traitement de l'information est prépondérant sont souvent appelés **systèmes à logiciel prépondérant**, la fonctionnalité apportée par la composante technique étant essentiellement portée par du logiciel. Un système de commandement militaire en est un exemple.

- ❑ Les technologies de l'information et de la télécommunication ont conduit à des systèmes orientés vers la fourniture de services aux usagers, tels que réseaux de télécommunication, réseaux à valeur ajoutée, système de localisation terrestre, systèmes de gestion du trafic routier et de guidage qui apparaissent typiquement comme des systèmes socio-techniques complexes. Ces services sont accessibles via des terminaux multifonction intégrant ces services (calculateurs de bord, téléphones portables...). Ils sont eux-mêmes de plus en plus complexes, ne serait-ce que par les aspects ergonomiques d'une interface usager qui doit être à la fois riche en fonctionnalités, intuitive, permissive et adaptée à des logiques mentales très diverses.

8.3.3 Prise en compte de l'ergonomie dans la conception des systèmes

On ne peut, dans le contexte de ce document, que donner quelques indications très partielles sur une discipline de plus en plus indispensable à l'ingénierie des systèmes complexes dans ses différentes approches et qui reste un domaine de recherche en forte évolution :

- ❑ Approche type « médicale », la plus ancienne, mais qui garde toute son importance avec la multiplication des réglementations et l'application du principe de précaution. Son objectif est la préservation de la santé et de la sécurité physique et psychologique de l'homme au travail.
- ❑ Approche à dominante technique, axée sur la conception des interfaces et des modes de commandes de systèmes automatisés. Le but est alors davantage l'augmentation de performance du système technique (efficacité, qualité, fiabilité, sécurité) grâce à l'opérateur plutôt que des considérations spécifiques à l'humain. On agit alors sur la formation de l'opérateur (dont l'apprentissage des procédures imposées par la machine) et sur ce que les ergonomes appellent la « cosmétique » du poste de travail (techniques de dialogue, de présentation des écrans, des alarmes, couleurs, etc..).
- ❑ Approche fondée sur la connaissance scientifique de l'homme, du fondement de ses comportements individuels et collectifs, de ses capacités cognitives et sensori-motrices. L'objectif est alors :
 - de penser le système et son comportement (dans ses composantes organisationnelle et technologique) en fonction des caractéristiques psycho-sociales, cognitives, perceptuelles, opératoires des humains (décideurs, utilisateurs, usagers, opérateurs),
 - de prendre en compte les variétés de ces caractéristiques individuelles et collectives, par exemple par adaptabilité à chaque individu ou groupe d'individus en interaction via les systèmes, voire auto-adaptativité au comportement individuel notamment au cours de l'apprentissage.

Voici, à titre d'exemples, quelques tâches pour lesquelles les apports de l'organisateur et de l'ergonome sont indispensables (en notant qu'elles peuvent se placer tout au long de la conception du système) :

- ❑ Prise en compte des particularités des parties prenantes :

- Analyse des facteurs culturels et des attitudes des parties prenantes utilisatrices face aux changements : opportunité du projet, aptitude à obtenir la coopération pour définir le besoin, techniques de motivation et de maîtrise du changement pour la mise en œuvre, etc...
- Analyse des types d'acteurs inclus dans la composante organisationnelle et/ou interagissant avec le système technique (usagers, utilisateurs professionnels, opérateurs, décideurs, maintenanciers) : culture, connaissances métier et système existantes, niveaux de formation initiale, pratiques collectives, etc...
- ❑ Analyse des impacts psycho-sociaux du système :
 - Depuis les études d'opportunité (acceptabilité sociale par toutes les parties prenantes susceptibles d'être concernées), puis tout au long des choix de spécification et conception, avec préparation de la maîtrise du changement et de la maîtrise des risques humains et sociaux correspondants.
- ❑ Répartition de tâches entre l'humain (organisé ou individuel) et la technologie et conséquences :
 - Analyse fonctionnelle globale de l'ensemble {organisation humaine et système technique} et définition des processus globaux. En particulier, ingénierie ou réingénierie des processus en fonction de possibilités offertes par la technique, notamment par les technologies de l'information : passage d'organisations hiérarchisées et tayloriennes à des organisations flexibles et réactives fondées sur le travail collaboratif et une part d'auto-organisation. Impacts sur l'organisation et la formation de la composante humaine.
 - Répartition des activités entre composante humaine et composante technique en tenant compte de leurs capacités et limitations respectives (bon sens et capacité à percevoir, analyser et synthétiser des scènes complexes de l'homme ; systématisme, puissance (physique et computationnelle) et précision de la machine).
 - Définition des processus, procédures, tâches humaines collectives et individuelles et analyse des attentes et contraintes qu'elles induisent sur le système technologique.
 - Définition des scénarios d'interaction voire de coopération entre humains et systèmes technologiques et entre humains à travers le système technologique pour réaliser ces tâches.
- ❑ Analyse de sûreté sécurité : parades face aux risques dus à l'humain, mais aussi utilisation de l'humain dans les « boucles de rattrapage ».
 - défauts de communication entre acteurs collectifs (référentiels sémantiques et culturels différents), entre acteurs individuels (référentiels psycho-cognitifs différents), entre homme et système (modèle mental différent du réel, traductions informations-données mal comprises),
 - phénomènes de fatigue, d'inattention, de confusion notamment dans des conditions de surcharge mentale ou de stress,
 - redondances entre déterminisme de la machine pour contrer l'indéterminisme accidentel ou intentionnel du comportement humain, bon sens humain pour pallier l'automatisme inexorable (ou les défaillances) de la machine.
- ❑ Conception des interfaces homme système avec leurs différents niveaux d'ergonomie cognitive, d'ergonomie perceptive et d'ergonomie biomécanique conduisant chacun à de multiples règles et approches ergonomiques.
 - Analyse des niveaux (sensori-moteurs et cognitifs) mis en jeu. Par exemple, dans les interfaces de pilotage, elle consiste à différencier les domaines
 - ✓ des tâches réflexes (perception → action) devenues automatiques,
 - ✓ des tâches conscientes fondées sur l'applications de règles ou de procédures préplanifiées conscientes (perception → reconnaissance → association état-tâche → application de la procédure),
 - ✓ des tâches impliquant de la résolution de problème ou de l'improvisation et nécessitant une connaissance profonde du système et des buts à atteindre ainsi qu'une capacité de modélisation de la situation (perception → reconnaissance → diagnostic → choix → (re)planification → mise en œuvre du plan et des procédures).
 - Approche cognitive : faire construire de bons modèles mentaux (image opérative efficace pour la pratique de l'opérateur) de la complexité du monde réel avec lequel l'opérateur interagit via le système, des buts qu'il peut atteindre, des tâches correspondantes qu'il peut effectuer.

- Approche cognitivo-comportementale de l'interaction. Elle concerne la définition du langage d'interaction au niveau de la sémantique des commandes (ce qu'elles font dans le monde réel), de la syntaxe d'interaction (comment le faire) et des retours (ce qui est fait) qui soit adapté, adaptable voire auto-adaptatif en fonction du type d'utilisateur (naïf, professionnel, ...), de son niveau dans la tâche (débutant, confirmé...) avec des aides à l'apprentissage, de ses caractéristiques individuelles (intuitif, réfléchi, introverti, extraverti...). Les techniques multimodales y participent.
 - Approche perceptuelle, tant de la représentation de la modélisation abstraite et nécessairement réductrice du monde réel que des aspects lexicaux du langage d'interaction. Il ne s'agit pas seulement d'une couche de cosmétique pour rendre les interfaces plus belles, mais bien de contribuer à établir la relation la plus directe possible entre le perçu, sa signification et les modèles mentaux sous-jacents, par exemple : permettre d'explorer le plus efficacement possibles les informations utiles pour l'appréhension d'une situation en vue de décision. Les techniques multimédia y participent.
 - Approches biomécaniques, anthropométriques et médicales.
- ☐ Définition des conditions de sélection des personnels opérateurs ainsi que des méthodes de formations et d'apprentissage notamment sur des simulateurs d'entraînement.
 - ☐ Dans le cadre de la définition du projet lui-même, faire construire des représentations mentales communes appropriées :
 - représentations des processus compatibles avec les caractéristiques des méthodes et outils de conception,
 - modèles cognitifs des mécanismes de coopération mis en jeu dans les situations de conception collective (co-conception ou conception distribuée, dans le cadre des processus d'ingénierie concourante), etc...

9 LE SYSTEME EST INTEGRE, VERIFIE, VALIDE, QUALIFIE ET PRODUIT

9.1 Introduction à la production du système

Une fois le système défini, il doit être produit. Cette production comporte :

- ❑ L'obtention des composants du système dûment validés : les composants sont acquis ou produits et font l'objet de vérifications et validations par rapport à leur spécification dans le dossier de définition du système.
- ❑ L'obtention du système dûment qualifié à partir de ses composants souvent appelée **IVVQ** (intégration, vérification, validation, qualification) :
 - ses constituants sont assemblés pour constituer le système, c'est l'**intégration** proprement dite,
 - tout au long de l'intégration, les constituants obtenus sont vérifiés en s'assurant qu'ils sont conformes à leur dossier de définition,
 - le système ainsi intégré est **vérifié** en s'assurant qu'il est conforme aux exigences système, confirmant ainsi qu'il a été bien conçu et construit,
 - le système est **validé** en s'assurant qu'il est conforme aux exigences initiales, et donc qu'il répond aux besoins et contraintes spécifiées par le maître d'ouvrage,
 - le système est **qualifié** en environnement opérationnel, montrant ainsi son aptitude à répondre au besoin opérationnel exprimé.

Ce processus correspond typiquement à la production d'un système unique.

Dans le cas d'un produit devant être réalisé en de multiples exemplaires, l'opération d'IVVQ est généralement réalisée plusieurs fois avec des objectifs de qualification différents, par exemple :

- ❑ une première fois sur un ou plusieurs prototypes de définition ou seulement sur leurs constituants les plus problématiques en vue de qualifier la définition du système (montrer qu'elle répond aux exigences système) autorisant de passer à la phase d'industrialisation,
- ❑ une deuxième fois, après industrialisation, sur un ou plusieurs prototypes premier de série ou une présérie en vue de la qualification industrielle autorisant le passage en production de série,
- ❑ enfin, une troisième fois sur un ou plusieurs exemplaires de série en vue de la qualification opérationnelle autorisant la mise en exploitation effective et la commercialisation.

L'ingénierie simultanée (ou concourante) consiste à intégrer conception et industrialisation et tend à faire la qualification de la définition directement sur le « prototype premier de série », en vue, notamment, de réduire le délais de mise sur le marché.

Remarque : Notons qu'un système unique peut contenir des sous-systèmes en multiples exemplaires pour lesquels on envisagera les trois niveaux de qualification. Ce serait par exemple le cas d'un système spatial de télécommunication fondé sur une constellation de satellites à défilement.

9.2 Principe de l'IVVQ

L'IVVQ comporte les opérations techniques d'intégration, vérification, validation. Elle est clôturée par la qualification, décision prise par l'acquéreur du système, qui autorise le passage à la phase ultérieure, par exemple à l'exploitation du système s'il s'agit de la qualification opérationnelle.

9.2.1 Définition des opérations d'IVV

L'IVV regroupe les opérations suivantes :

- ❑ **Intégration** : Opération d'assemblage et de test permettant, en cours de développement ou de fabrication, de s'assurer que la construction d'un produit ou d'un système à partir de ses composants s'effectue conformément aux données issues de la conception.

Préparée donc lors de la décomposition et de la conception architecturale, l'intégration se décrit comme une opération systématique d'assemblage progressif des produits de l'arborescence système à partir des composants élémentaires. Elle consiste à interconnecter via leurs interfaces, les éléments dûment validés et à vérifier que les assemblages ainsi produits offrent les comportements spécifiés sur leurs propres interfaces (ceux attendus par les éléments du système ou externes auxquels ils seront par la suite interfacés)

- ❑ **Vérification** : Confirmation par examen et apport de preuves objectives que les exigences spécifiées sont satisfaites.

On s'assure que chaque produit (constituant, produit contributeur) obtenu au cours de l'intégration est conforme à ses exigences spécifiées dans le dossier de définition, et *In fine* que le système est conforme aux exigences système. Ces vérifications de conformité tendent à montrer que le système a été conçu et construit sans erreur.

- ❑ **Validation** : Confirmation par examen et apport de preuves objectives que le système répond aux besoins de son acquéreur dans l'environnement opérationnel et les conditions d'emploi qu'il a définis.

On s'assure que chaque produit obtenu au cours de l'intégration est conforme aux exigences qui lui ont été allouées par « son client » et, *In fine*, que le système est conforme aux exigences initiales de son acquéreur. Ces validations tendent à montrer que le système répond aux besoins exprimés.

Dans le cas de sous-traitance, les essais de validation sont réalisés par le fournisseur en environnement simulé ou réel. La démonstration de conformité conduit l'acquéreur d'un produit à prononcer sa réception.

Remarque : les concepts de vérification et de validation sont traités de manière générale en 12.3.2.1

9.2.2 Mise en oeuvre de l'IVV

L'IVV est préparée par le plan d'IVV. Celui-ci est défini pour l'essentiel lors de la conception architecturale du système. Il définit :

- ❑ L'ordonnancement des opérations d'assemblage
- ❑ La justification des essais à réaliser à chaque stade de l'assemblage. Dans le cas de la recherche de la qualification de la définition d'un système à produire en multiples exemplaires, il s'agit du plan justificatif de la définition (PJD).
- ❑ La planification de l'intégration et des essais
- ❑ La définition des environnements d'intégration : plate-forme d'intégration, bancs d'essais et outillages de tests, simulateurs d'environnement, simulateurs de constituants à disponibilité tardive, système d'archivage des conditions et résultats d'essais...

Stratégie de validation

Dans une vision un peu théorique, la préparation et le suivi des activités d'IVV (intégration, vérification, validation) s'appuie notamment sur :

- ❑ les matrices de couplage (Figure 42) qui montrent l'ensemble des interfaces entre constituants, donc les interfaces à interconnecter lors des assemblages ainsi que les interfaces à valider sur les assemblages successifs en s'assurant que ces derniers présentent bien tous les comportements attendus par les éléments qui devront lui être interfacés dans la suite de l'intégration,
- ❑ les matrices de vérification qui associent à chaque exigence, à quelque niveau qu'elle se place dans la décomposition, la ou les méthodes permettant de vérifier son obtention sur le système ou ses

constituants,

- ☐ les matrices de traçabilité des exigences qui permettent d'anticiper les effets sur les exigences systèmes d'exigences non vérifiées sur les constituants ou encore de retrouver l'ensemble des constituants potentiellement responsables d'une exigence système non vérifiée.

La stratégie de V & V consiste à optimiser les tests et essais pour avoir globalement la meilleure garantie de validation pour un coût acceptable.

Sachant que la cause d'une non-conformité constatée sur un assemblage est d'autant plus difficile à trouver qu'elle provient d'un constituant ou de l'interaction de constituants plus enfouis dans l'assemblage, et qu'alors elle risque de nécessiter un retour en conception puis une reprise du processus d'intégration à partir des constituants modifiés, le principe consisterait à se garantir par une validation complète de tout constituant entrant en intégration. Ceci est bien souvent irréaliste, et certains essais ne sont faisables que sur le système complet :

- ☐ pour des raisons économiques (on ne peut, par exemple, réaliser les simulateurs d'environnement, notamment d'ambiance pour tous les constituants, ce qui introduirait des coûts prohibitifs) ou encore de délais.
- ☐ pour des raisons fondamentales : explosion combinatoire des parcours dans l'espace des états du système interdisant de tester tous les comportements possibles dans toutes les hypothèses d'environnement, comportements émergents qui n'apparaissent que sur des assemblages (interactions thermique, interactions électromagnétiques, vibrations, résonances, etc).

Par ailleurs, la vérification indépendante de chaque exigence est insuffisante pour garantir la conformité du système, par exemple les essais de tenue aux chocs et de tenue aux vibrations garantissent-ils la tenue simultanée aux deux sollicitations dans différentes conditions climatiques limites ? Il n'est presque jamais envisageable de faire des essais simultanés exhaustifs dans toutes les hypothèses. Par contre, on peut apporter des preuves en utilisant les marges, par exemple à travers des essais en durcissant certaines conditions (d'ambiance par exemple) par rapport aux exigences.

Il s'agit donc de définir à quel niveau d'assemblage chaque exigence ou ensemble d'exigences doit être prouvé, en évitant les impasses (exigence système non vérifiée) et en limitant les risques de rétroaction sur le processus d'intégration, en optimisant les choix de techniques de preuves et essais pour rester dans des limites de coût et de délais acceptables. Les méthodes de simulation comportementales peuvent apporter directement certaines preuves et sont très utiles pour justifier de la validité des essais et de la stratégie d'optimisation.

La stratégie d'essais et sa justification est consignée dans le plan de V & V souvent appelé **plan justificatif de définition** (PJD) qui définit les preuves théoriques à établir ou les essais à mener pour prouver sa conformité aux exigences avec une couverture suffisante. Le **dossier de justification de la définition** (DJD) répertorie les résultats obtenus

Les méthodes de vérification de satisfaction d'exigences peuvent s'appuyer sur :

- ☐ Des inspections :
 - Examen visuel des composants du système,
 - Examen de la documentation,
 - Relecture de code (cas de scénario non testable).
- ☐ Des analyses théoriques :
 - Evaluation théorique de la satisfaction d'une exigence par étude analytique, modélisation (exemple : tenue mécanique par simulation après modélisation en éléments finis), simulation numérique, calcul ou étude comparative, preuve formelle (exemple : démonstration sur modèle en réseau de Petri qu'un état indésirable ne pourra jamais être atteint).
- ☐ Des démonstrations :
 - Evaluation de la satisfaction d'une exigence par observation du système en fonctionnement sans utilisation d'instrumentation spécifique.
- ☐ Des tests ou essais :
 - Evaluation de la satisfaction d'une exigence par exploitation des données acquises lors de la mise en œuvre de tout ou partie du système au moyen d'une instrumentation spécifique.

Toute évolution au cours des tests et essais doit faire l'objet d'une étude d'impact, pouvant entraîner un rebouclage sur la conception. Toute modification faite au cours de l'intégration, tant pour correction de non-conformité que pour évolution, implique de vérifier qu'elle n'introduit pas de régression (autres exigences préalablement vérifiées qui ne seraient plus satisfaites). Après étude d'impact de toute évolution, il est fortement conseillé de regrouper les évolutions impactant un constituant ou un niveau donné du système, afin d'éviter la multiplication des configurations intermédiaires nécessitant autant de reprises de la conception et de l'intégration ainsi que de la V & V (introduction de la notion de « train de modifications » ou de « configuration cible » ou d' « état technique »).

9.2.3 La Qualification

Qualification : ce terme a différentes acceptions suivant les secteurs d'activité. Nous proposons de considérer qu'une qualification est une décision positive prise en fin de processus IVV, en principe par « l'acquéreur » du système, ce terme étant pris au sens large, au vu de l'ensemble des justifications (notamment de vérification et validation) présentées par le « fournisseur ». Elle autorise d'aborder une nouvelle phase du cycle de vie. On distingue généralement trois types de qualification (Figure 48) :

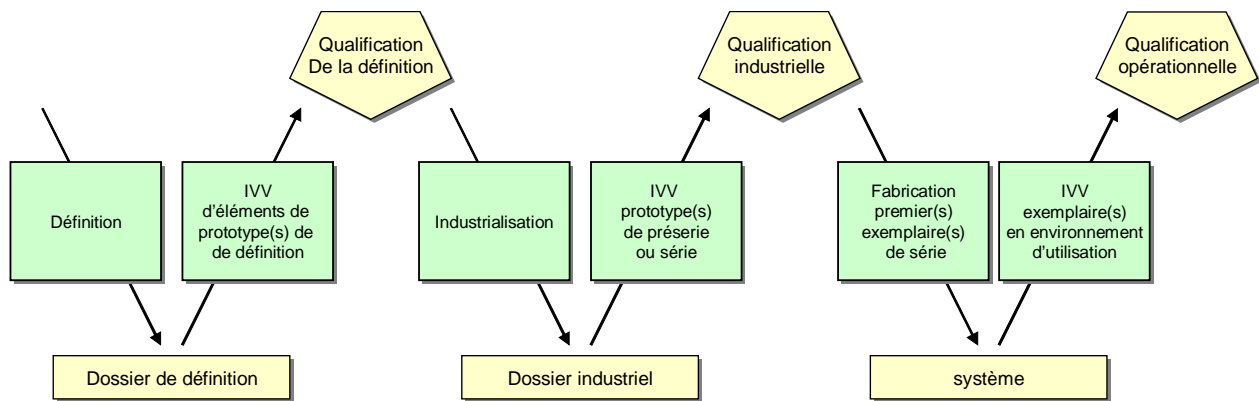


Figure 48 : IVV et qualification

- ❑ **Qualification de la définition** : Décision prise par « l'acquéreur », au vu des justifications présentées par le fournisseur démontrant la conformité de la définition aux exigences (un système répondant au dossier de définition sera conforme aux exigences système). Elle autorise le passage à l'industrialisation.
- ❑ **Qualification industrielle** : Décision prise par « l'acquéreur », au vu des justifications validant le dossier industriel (approvisionnement, fabrication, contrôle) donnant des garanties sur la répétitivité et la fidélité du système de production, autorisant le lancement de la fabrication de série
- ❑ **Qualification opérationnelle** : Décision prise par « l'acquéreur », après une période probatoire d'exploitation (en conditions réelles ou représentatives) démontrant la satisfaction du besoin opérationnel exprimé, et permettant de lancer, avec une assurance suffisante, la mise en exploitation du système (ou sa commercialisation).

En plus de la qualification, un système peut être soumis à certification et/ou homologation.

Certification : La certification est, en droit, une assurance par écrit. Parmi les différentes formes de certification on retiendra ici la Certification tierce partie. La Certification tierce partie est le processus de vérification de la conformité d'une entité (produit, processus, organisation) à un référentiel publié (norme, règlement, cahier des charges, spécification, technique pour un produit), effectué par un professionnel indépendant, compétent et contrôlé, appelé organisme certificateur. Dans certains cas, par exemple l'aéronautique, l'autorisation de mise en exploitation ou de commercialisation d'un système nécessite une ou des certifications concernant ce système et éventuellement son environnement de fabrication ou d'exploitation.

Homologation : L'homologation est la certification conforme d'un produit à une norme, ou à une réglementation. En d'autres termes l'homologation garantit au consommateur que le produit qu'il achète ou utilise correspond à ce qu'il est en droit d'en attendre.

Exemple : La mise en circulation sur la voie publique d'un véhicule, automobile est soumise à l'obtention d'un certificat d'homologation de la part du service des mines (seule instance légale à fournir ce certificat).

Tout constructeur de véhicules est obligé de présenter à ce service un exemplaire de tout modèle avant commercialisation. Il est tenu de fournir une copie du certificat d'homologation avec chaque véhicule, afin que l'utilisateur puisse attester auprès des autorités de la conformité du véhicule.

L'utilisateur d'un véhicule homologué a l'interdiction formelle d'utiliser ce véhicule sur la voie publique après en avoir modifié les caractéristiques (sauf à avoir fait homologuer le véhicule modifié) .

10 LE SYSTEME A UNE VIE OPERATIONNELLE

10.1 Introduction à la vie opérationnelle

La vie opérationnelle du système correspond à la période de son cycle de vie où il est exploité. Pour un système répétitif, elle démarre à la mise en service opérationnel du premier exemplaire et se prolonge jusqu'au retrait de service du dernier exemplaire.

Pendant sa vie opérationnelle, l'exploitation du système ou de ses exemplaires nécessite un certain nombre de systèmes contributeurs. Ces systèmes contributeurs ont pour but de produire (nouveaux exemplaires, rechanges), de déployer et mettre en service (par exemple lancement et mise à poste des différents satellites d'une constellation pour un système de télécommunication spatial), d'exploiter, de maintenir en condition opérationnelle (ravitaillement, testabilité, maintenance préventive, curative et évolutive), de retirer du service (démantèlement, recyclage, traitement de déchets).

Certains de ces systèmes contributeurs sont préexistants au système principal (organisation maîtrise d'ouvrage, usine de production, lanceur de satellites).

Certains sont plus directement liés au maintien en condition opérationnelle (MCO) du système en exploitation. Ils sont regroupés dans ce qu'on appelle le **système de soutien**.

Dans certains contextes le terme Système de soutien désigne l'ensemble des systèmes contributeurs utilisés tout au long du cycle de vie opérationnel du système. Le sous-ensemble des systèmes contributeurs nécessaires au MCO du système en opération est alors appelé système de soutien opérationnel.

Les paragraphes suivants parcourent très succinctement les besoins en systèmes contributeurs pendant la vie opérationnelle.

10.2 Le système est préparé pour être mis en service

La **transition vers l'exploitation** du système est très dépendante du type de client-exploitant et donc du type de système. De manière très générale, elle implique une adaptation réciproque système<=>environnement (intégration avec les autres systèmes de l'environnement du système principal et de son système de soutien) :

- ☐ Système unique : intégration dans l'environnement d'exploitation (et vérifications associées), intégration du système de soutien dans le système de soutien existant et vérifications de l'aptitude au soutien, formation initiale des utilisateurs et exploitants....
- ☐ Système déployé (réseau de commutateurs par exemple) : intégration dans l'environnement du ou des systèmes pilotes et après vérification d'aptitude au service, déploiement dans le temps des autres exemplaires en les intégrant à l'ensemble déjà en service et déploiement simultané du système de soutien. Un système peut connaître plusieurs déploiements (systèmes de défense, de protection civile ou de crise projetés et déployés sur de nouveaux théâtres opérationnels).
- ☐ Produits industriels : personnalisation (customisation) du produit pour chaque client ou un marché (par exemple aménagement intérieur d'un avion de ligne), définition de la politique de maintenance associée tenant compte de l'environnement de soutien client, puis mise en service des exemplaires successifs.
- ☐ Produits grands publics (par exemple automobile) : préparation préalable des réseaux de distribution et de maintenance.

Lorsque le système remplace un système existant, la transition implique des reprises d'existant (par exemple migration des données, transposition de code) ainsi qu'un processus de basculement de l'ancien système vers le nouveau garantissant le niveau de continuité du service exigé.

10.3 Le système est exploité et utilisé

Après sa mise en service, le système (ou chacun de ses exemplaires) est **exploité** - par l'exploitant(s) - et **utilisé** - par l'utilisateur(s) des services qu'il fournit.

Exploitant(s) et utilisateur(s) peuvent être une même entité ou des entités séparées. Un exploitant d'un système fournissant des services à de multiples usagers est souvent appelé **opérateur** (opérateur de télécommunication par exemple). Certaines tâches liées à l'exploitation du système sont assurées par des acteurs humains, généralement appelés "opérateurs".

Le système peut, à certains moments, être en fonctionnement sans être en service opérationnel (par exemple arrêt du service pour maintenance préventive, mise à niveau technique du système, entraînement des opérateurs).

Le domaine de l'exploitation est très dépendant du type de système. De manière très générale, l'exploitant cherche à optimiser constamment le service rendu par le système grâce aux éléments d'adaptation mis à disposition des opérateurs, ceci tout en maîtrisant les risques d'exploitation (par exemple, dilemme classique entre disponibilité et sécurité : vaut-il mieux, dans les systèmes de transport, arrêter ou retarder le service que de prendre le risque, même très faible, d'un accident ?).

Tout au long de son utilisation, le système fait l'objet de mesures de performances et d'enquêtes de satisfaction ayant pour objectif des évolutions positives du système : amélioration de la qualité de service et/ou du retour sur investissement, introduction de fonctionnalités nouvelles. Cet aspect est particulièrement important pour les systèmes facilement évolutifs, notamment les systèmes à logiciel prépondérants : systèmes sociaux-techniques, systèmes de systèmes...

10.4 Le système est maintenu en condition opérationnelle

10.4.1 Le besoin de maintien en condition opérationnelle

L'exigence de disponibilité du système, pour remplir sa mission, s'analyse à deux niveaux temporels :

- ☐ A tout instant de sa vie opérationnelle, le système doit être maintenu en état de fonctionner conformément aux exigences de disponibilité spécifiées pour ses fonctions. Ceci implique qu'il soit dûment ravitaillé et maintenu en état de bon fonctionnement.
- ☐ Au cours de sa vie opérationnelle, le système doit évoluer pour faire face à des modifications de l'environnement ou à des évolutions de mission ou encore à l'obsolescence de ses constituants. Généralement peu auto-adaptatif (moins que les systèmes biologiques ou sociaux), le système doit subir les adaptations correspondantes allant de simples mises à niveau, extensions, ré-agencement ou redéploiements jusqu'à des ré-ingénieries partielles ou totales.

Le maintien en condition opérationnelle (MCO) du système répond ainsi à une deux finalités : garantir le bon fonctionnement courant du système et garantir son adaptation aux évolutions nécessaires.

Il peut être défini comme l'ensemble des moyens et procédures nécessaires pour qu'un produit reste, au long de sa durée d'utilisation, apte à l'emploi qui lui est assigné.

Par exemple, La notion de maintien en condition opérationnelle des matériels militaires recouvre deux types de fonctions :

- ✓ **Soutien à caractère technique** qui regroupe trois grandes catégories d'opérations :
 - la maintenance proprement dite, comprenant les actions visant à maintenir (ou rétablir) un équipement dans un état spécifié (telles que les carénages pour l'entretien des coques des bateaux, la reconstitution du potentiel d'heures de vol d'un aéronef ou le changement de moteur d'un char) ;
 - la gestion de configuration des équipements qui permet de suivre l'évolution de la définition technique des matériels au long de leur vie opérationnelle ;

- la tenue à jour des référentiels techniques, mais aussi le retour d'expérience issu de l'exploitation des faits techniques.

- ✓ **Soutien à caractère logistique.** Il comprend les opérations d'approvisionnement des rechanges, la maintenance de ceux-ci, leur stockage et le ravitaillement en pièces de rechange des unités utilisatrices, des structures de soutien (ateliers industriels) voire, dans certains cas, des industriels assurant la production des rechanges.

L'ensemble de ces fonctions de maintien en condition opérationnelle est assuré par ce qu'il est convenu d'appeler le **système de soutien** ou, quelquefois, le système de soutien opérationnel.

Les fonctions à assurer au sein du système de soutien - des fonctions d'exploitation aux fonctions de maintenance - ont donc pour objectif d'assurer la fourniture d'un service :

- ☐ permanent (respectant les exigences spécifiées de disponibilité),
- ☐ optimisé (utilisant au mieux, à tout instant de l'utilisation, les ressources utilisables du système et, éventuellement, ajoutant ou modifiant des ressources pour s'adapter aux nouvelles situations ou nouvelles demandes de services).

L'ensemble de ces fonctions constitue un continuum qui peut conduire à mettre en place plusieurs échelons ou niveaux techniques d'intervention en exploitation et maintenance.

Le système principal peut intégrer un (ou plusieurs) sous-système(s), dénommé parfois "système de gestion ou d'administration", qui lui confère les aptitudes (spécifiées) à l'exploitabilité, à l'évolutivité ainsi qu'à la maintenabilité.

Un système satellitaire de télécommunication inclut son centre de contrôle et son centre de mission. Un système d'information inclut son sous-système d'administration du système d'information (gestion des flux, des données, des applicatifs, des habilitations) ainsi que son sous-système d'administration des systèmes informatiques (administration technique des systèmes, des réseaux, des SGBD), etc.

Le système de soutien est le système contributeur qui met en œuvre ces aptitudes.

Le système de soutien est généralement un système à forte composante humaine, il assure en particulier toutes les interventions physiques sur le système (installation, modification matérielle, test, maintenance par remplacement d'équipements, vérification de bon fonctionnement après intervention, ravitaillement, transport...).

En plus du "système de gestion", intégré au système, le système de soutien utilise des produits contributeurs nécessaires au maintien en condition opérationnelle du système, par exemple outils de ravitaillement, outils de maintenance (montage-démontage, test, diagnostic...) ainsi que ses propres outils de support, notamment le système informatisé de gestion du soutien.

Dans le cas des systèmes et produits complexes, les aspects de logistique tiennent une place importante dans le soutien, d'où l'appellation courante de **système de soutien logistique** recouvrant l'ensemble du soutien opérationnel.

Ce système apparaît enfin comme un système contributeur qui doit être conçu en symbiose avec la conception du système principal d'où le concept de **soutien logistique intégré**, voir chapitre 10.4.3 ci-dessous.

10.4.2 La maintenance des systèmes

La maintenance proprement dite d'un système peut recouvrir différentes sortes de maintenance :

- ☐ la **maintenance préventive** (inspection, échange systématique des pièces d'usure, analyse des anomalies répertoriées n'ayant pas encore conduit à défaillance...). Elle peut se faire à différents niveaux, par exemple : maintenances systématiques tous les X heures de service, révisions trimestrielle, reconditionnement du système à mi-vie,
- ☐ la **maintenance curative** intervenant sur défaillance pour remettre le système en condition opérationnelle,

- ☐ la **maintenance corrective** pour remédier aux défauts de conception ou de fabrication,
- ☐ la **maintenance perfective** ou **maintenance évolutive** visant à une meilleure adaptation du système à son environnement et sa mission tenant compte de leur évolution, ou encore à des adaptations technologiques (optimisation, traitement des obsolescences).

Dans les produits industriels, le **concept de maintenance** est défini par le constructeur du produit et traite des aspects génériques applicables à la maintenance du produit pour garantir son bon fonctionnement, la **politique de maintenance** en est une adaptation aux spécificités de l'exploitant.

Compte tenu des différents types d'intervention de maintenance, l'organisation de maintenance peut comporter différents **niveaux techniques d'intervention (NTI)** ou **échelons** caractérisés par leur réactivité d'intervention et leur niveau de compétence et de moyens de réparation.

Un tel niveau technique d'intervention représente un ensemble de moyens en personnels et en matériels permettant de faire face à des charges de maintenance qualitativement et quantitativement définies.

A titre d'exemple, au sein des forces armées la fonction maintenance est organisée suivant trois niveaux techniques d'intervention (NTI) :

- ✓ *Le NTI 1 assure la mise en œuvre et la maintenance en ligne du matériel (traitement en piste avant et après vols pour les aéronefs, entretien courant des bâtiments de la marine). Les opérations sont effectuées avec des moyens limités, par les utilisateurs des matériels eux mêmes ou par des structures légères de proximité (ateliers de piste pour les aéronefs). Pour le matériel roulant, ce NTI 1 s'apparente aux opérations qu'un utilisateur de voiture averti peut réaliser lui-même sur son véhicule.*
- ✓ *Le NTI 2 correspond aux opérations de maintenance préventive programmée ou curative visant soit à restaurer le potentiel de "vie" des équipements, soit à réaliser des réparations lourdes, exécutées par un organisme de soutien dédié, situé ou non sur le site des utilisateurs. Il s'agit, par exemple, des opérations réalisées par les escadrons de soutien spécialisé des bases aériennes. Les équipements nécessaires au NTI 2 sont adaptés à ce niveau d'intervention, plus poussé que le NTI 1.*
- ✓ *Le NTI 3 correspond aux opérations "lourdes" de maintenance programmée préventive de reconstitution de potentiel ("grandes visites") ou de réparations à caractère industriel exécutées chez les industriels ou dans des établissements spécialisés nécessitant des moyens véritablement industriels. Ces opérations sont souvent l'occasion de remises à niveau et de modernisation des matériels ou de leurs équipements.*

10.4.3 Le soutien logistique intégré

Le maintien en condition opérationnelle d'un système technologique complexe met en œuvre un ensemble de processus et moyens appelés **éléments du soutien logistique** (voir Figure 49).

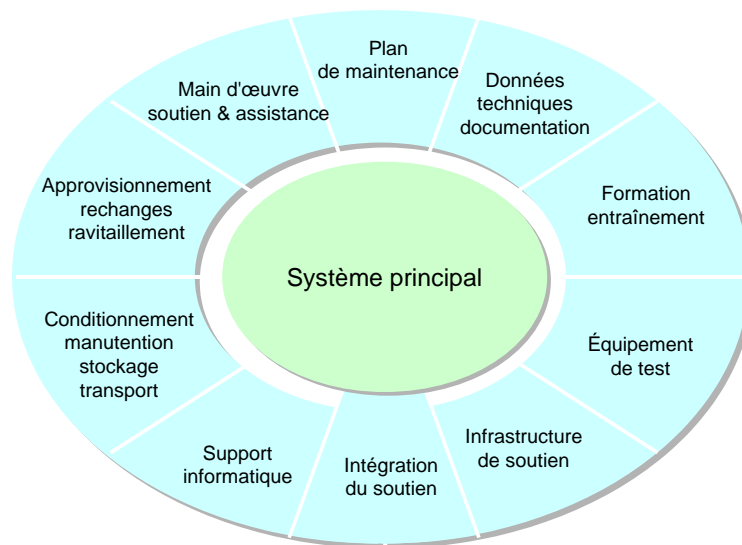


Figure 49 : Les dix éléments du soutien logistique (d'après l'ancien standard : MIL STD 1388-1A)

L'**ingénierie du soutien** (qui définit les éléments de soutien) est généralement appelée **analyse du soutien logistique** (ASL). Elle fait partie de l'ingénierie système qui doit conférer au soutien l'aptitude à soutenir le système principal et, à ce dernier, l'aptitude à être soutenu.

Pour un système destiné à plusieurs clients, l'ingénierie du soutien se répartit entre le fournisseur qui définit les aspects génériques des éléments de soutien, et chaque exploitant qui les complète en définissant le système de soutien propre à leurs exemplaires en cohérence avec leur politique de soutien.

Les normes d'IS insistent sur l'intégration entre IS et ASL en attribuant à l'IS la définition des produits contributeurs tandis que les standards de soutien logistique le font en développant le concept de **soutien logistique intégré**, voir Figure 50.

Le Soutien Logistique Intégré (SLI) consiste à intégrer fortement la conception et le développement des éléments du soutien à ceux du système principal. Il a pour but d'optimiser, sur l'ensemble système principal et système de soutien, le rapport service rendu sur coût du cycle de vie (ou coût global de possession - intégrant les coûts d'acquisition, exploitation et soutien).

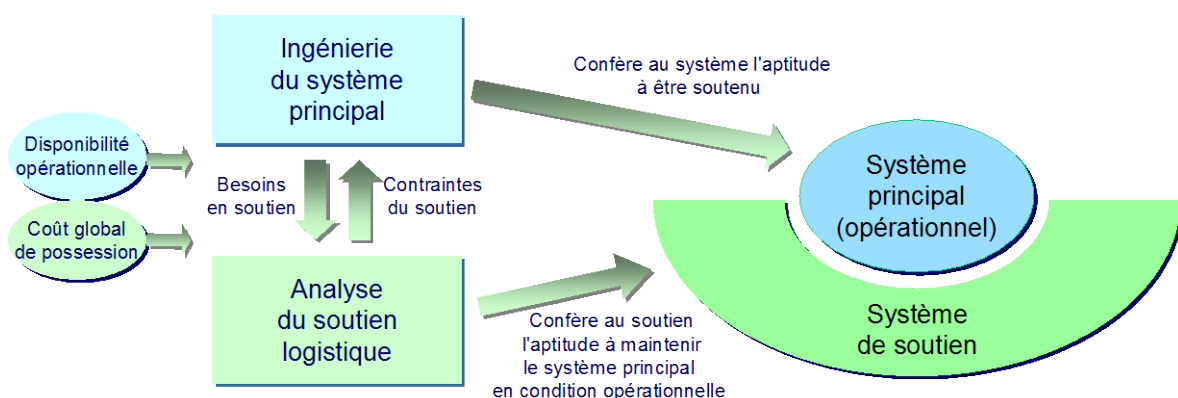


Figure 50 : Le soutien logistique intégré

Le SLI implique donc l'intégration d'un large ensemble de disciplines. Voici une liste des disciplines et des éléments de soutien mise en œuvre dans le soutien logistique intégré inspiré de l'Integrated Logistic Support Defence Standard (Def Stan) 00-60:

- analyse du soutien logistique,

- plan de maintenance,
- approvisionnement, ravitaillement,
- obsolescence, acquisition et gestion des rechanges,
- main d'œuvre de soutien,
- coût total de cycle de vie,
- équipements de support et de tests,
- fiabilité et maintenabilité, sécurité, testabilité et autres disciplines de conception,
- moyens et outillage de soutien,
- formation, entraînement et équipements associés,
- documentation technique,
- conditionnement, manutention, stockage, transport,
- données et support logiciel,
- gestion de configuration,
- Retrait de service.

De nombreux acteurs sont concernés par le SLI : concepteurs, exploitants, maintenanciers, industriels... Des normes et standards définissent également les domaines de données de soutien (MIL STD 1388-1B) et leurs règles d'échange (notamment à la suite de l'initiative CALS, *Continuous Acquisition and Logistic Support*, lancée par l'administration et les industriels de la défense).

On attend de cette intégration (IS/ASL) entre ingénierie système et ingénierie du soutien :

- ☐ La cohérence globale de l'ensemble système principal et système de soutien avec :
 - la prise en compte des exigences de soutien dès le début de l'ingénierie système,
 - la vérification, tout au long de la conception, de l'aptitude du système à son soutien et de l'aptitude du système de soutien à répondre aux exigences de disponibilité et aux contraintes de maintenance dues aux choix techniques,
 - la préparation des acteurs aux tâches d'exploitation, de logistique et de maintenance,
- ☐ L'optimisation du rapport disponibilité opérationnelle sur coût global de cycle de vie :
 - La disponibilité opérationnelle est fonction, d'une part, de la fiabilité et de la maintenabilité du système et, d'autre part, de la réactivité et de l'efficacité de son soutien. Elle recouvre la qualité de service en termes notamment de sûreté de fonctionnement et de sécurité associée.
 - Le coût du cycle de vie ou coût global de possession est, pour l'acquéreur, constitué :
 - ✓ d'une part du coût d'acquisition du système principal et des coûts directs d'exploitation (coûts humains et de ravitaillement) principalement déterminés par la conception du système principal,
 - ✓ d'autre part des coûts du soutien sur toute la durée de vie opérationnelle du système, principalement déterminés par l'analyse du soutien logistique.

10.5 Le système est retiré du service

Initialement réservée à des systèmes particuliers (le nucléaire avec les aspects de démantèlement robotisé, retraitement des éléments irradiés, conditionnement et stockage des déchets en est l'exemple type), la prise en compte de la problématique du retrait lors de leur conception concerne aujourd'hui quasiment tous les systèmes, en particulier du fait de l'évolution de la réglementation (notamment européenne) sur le traitement des déchets et le recyclage.

Notons qu'un retrait de service peut également être suivi d'une phase de réutilisation de tout ou partie du système pour d'autres usages, ou peut s'accompagner de problèmes de transition ou de migration vers le système remplaçant.

La fin du cycle de vie d'un système a logiquement lieu après le retrait de service du dernier exemplaire.

PARTIE 4 : INGENIERIE SYSTEME

Guide de lecture de la partie 4

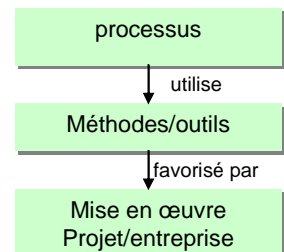
Les trois parties précédentes nous ont respectivement permis de décrire :

- ☐ Ce qu'est un système, avec la double vision « système à faire » et « système pour faire »,
- ☐ Comment le système à faire est spécifié pour répondre aux besoins des parties prenantes dans le cadre de sa finalité,
- ☐ Comment le système est conçu, intégré, vérifié et validé, produit, déployé, maintenu en condition opérationnelle et retiré du service.

Nous avons donc maintenant tous les éléments pour revenir au « système pour faire » abordé de manière générique sous le titre « Ingénierie Système » et répondre à la question "Comment ?" (Comment s'y prendre pour faire le système).

La recherche de généricité nous amène à réfléchir sur ce qui est invariant quel que soit le type de système à faire, de projet pour le faire, ou d'organisation industrielle sous-jacente. Cette réflexion nous conduit à aborder l'ingénierie système selon trois points de vue, car elle présente elle-même un caractère systémique :

- ☐ Ses processus qui décrivent les types d'activités à mener pour bien faire des systèmes (bonnes pratiques). L'expérience acquise par la communauté IS est devenue suffisante pour conduire à une certaine standardisation de ces activités, consignée dans des normes,
- ☐ Ses méthodes et outils méthodologiques pour réaliser ces activités,
- ☐ Sa mise en œuvre industrielle dans les entreprises, avec notamment son management au niveau des projets, de l'entreprise, du processus d'acquisition chez un maître d'ouvrage.



Le chapitre 12 sur les processus s'appuie sur un rappel concernant la qualité (Figure 51), justifiant l'approche d'un métier complexe comme l'IS par ses processus et préparant les aspects du management de projet et du déploiement de l'IS dans l'entreprise. Les trois normes principales d'IS y sont présentées.

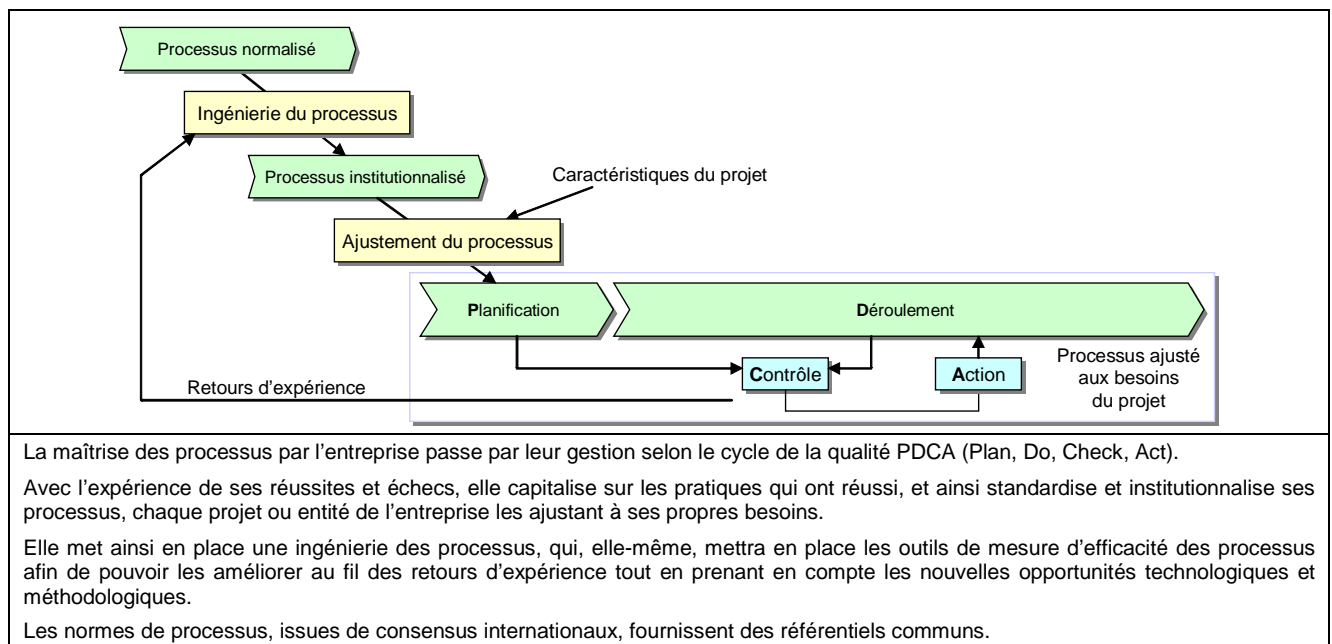


Figure 51 : les processus, clé de la qualité

L'ensemble des processus d'IS est succinctement exploré en s'inspirant plus particulièrement de la norme ISO 15288 qui présente la couverture la plus large. La typologie des processus support de cette présentation est indiquée Figure 52.

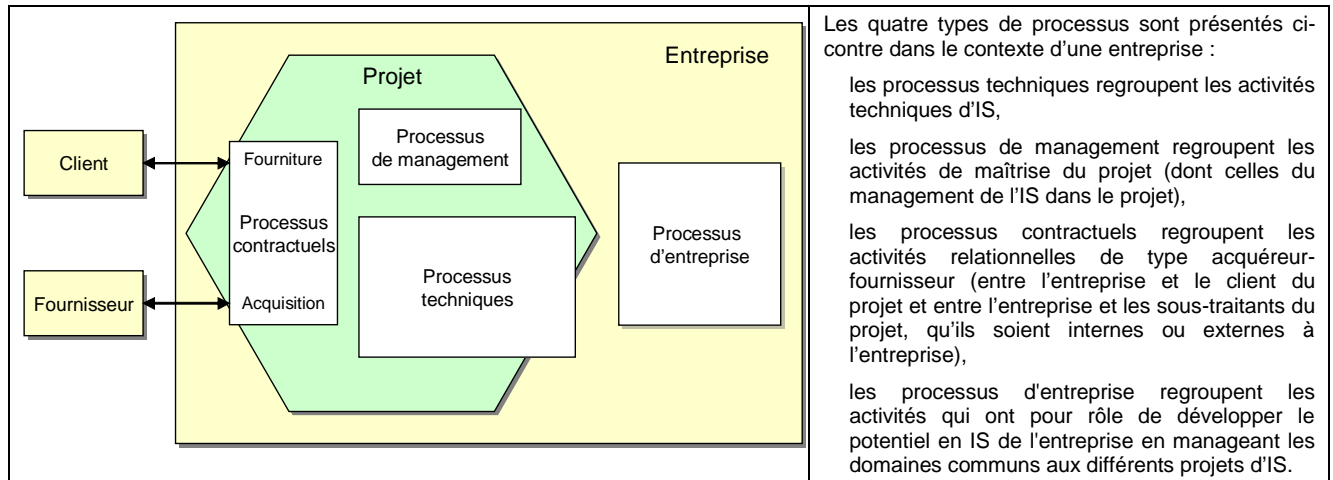


Figure 52 : Typologie des processus concernant l'IS

Les processus techniques couvrant l'analyse des exigences et la conception sont ensuite décomposés en activités, en s'inspirant plus particulièrement de la norme IEEE 1220, la plus détaillée sur ce domaine. La Figure 54 les présente en regard des types de modélisation correspondants.

Les processus, décrits dans le chapitre 12, définissent les types d'activités à faire.

Les méthodes et outils méthodologiques pour faire ces activités font l'objet du chapitre 13.

Les méthodes, fondées sur les sciences et techniques, définissent les démarches à mener pour réaliser les activités des processus, s'appuient sur des outils méthodologiques et des approches de modélisation pour représenter et simuler les systèmes et sont supportées par des outils informatisés. La nécessité de travail collaboratif pluridisciplinaire implique l'interopérabilité de ces derniers, donc au minimum des modèles sémantiques communs des concepts de l'ingénierie système permettant les échanges de données entre les outils utilisés dans chaque métier ou discipline.

Devant la multitude des méthodes et outils méthodologiques et face à l'obsolescence rapide des outillages informatiques qui les supportent, nous avons choisi de nous limiter à un nombre très restreint d'exemples de méthodes ou outils méthodologiques qui nous paraissent particulièrement significatifs en IS, sans aborder leurs supports informatiques (voir Figure 53).

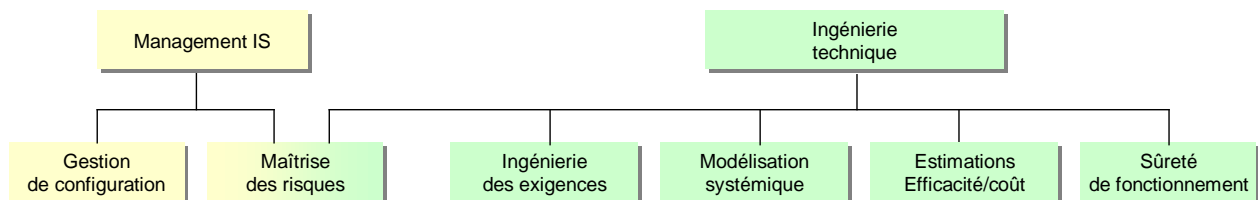


Figure 53 : Les méthodes abordées dans ce chapitre

Les méthodes et outils méthodologiques que nous avons choisi de présenter ici sont les suivants :

- ❑ Au titre des outils méthodologiques de base, nous abordons succinctement deux outils méthodologiques fondamentaux, généralement les premiers à être déployés :
 - L'ingénierie des exigences, base indispensable pour constituer et gérer les référentiels d'exigences tout en assurant leur traçabilité tout au long du développement.

- La gestion de configuration qui garantit la cohérence de la définition du système, la conformité des exemplaires et la maîtrise de leurs évolutions.

- ❑ Nous abordons le thème de la modélisation en développant les approches de modélisation systémique utilisées tout au long du processus d'ingénierie pour représenter les architectures et leur fonctionnement et pour guider la conception. Partant de la vision traditionnelle des approches de modélisation architecturale de systèmes synthétisée Figure 54 en regard des processus correspondants, nous donnons un aperçu de la standardisation récente du langage SysML de représentation des systèmes, puis de grilles d'analyse, applicables notamment aux systèmes sociaux techniques..

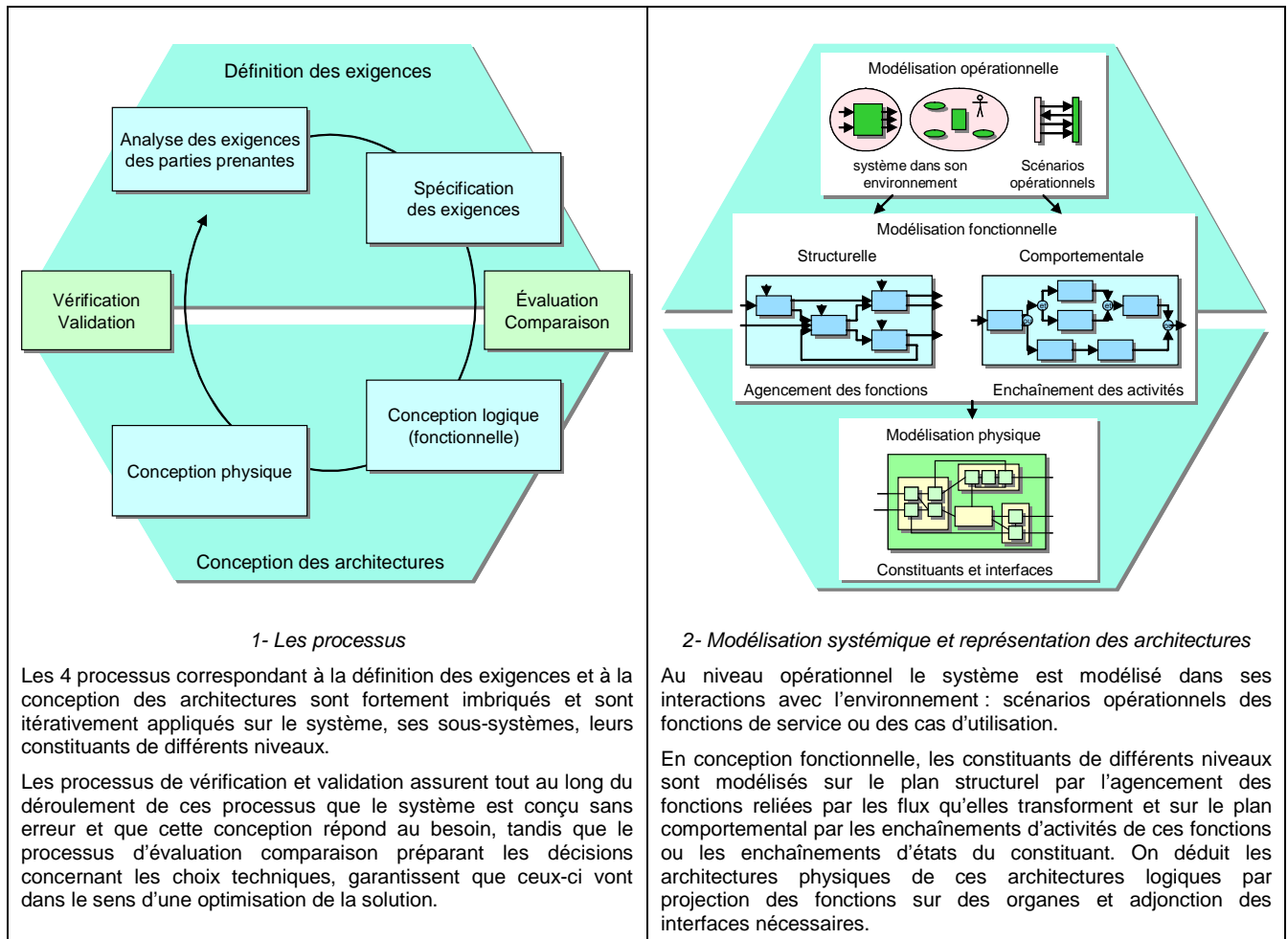


Figure 54 : Processus de conception et modélisation systémique

- ❑ Nous donnons quelques indications sur la maîtrise des risques qui représente un élément majeur de la maîtrise des projets impliquant tant des aspects techniques d'IS que des aspects managériaux et qui constitue une base indispensable pour les deux paragraphes suivants.
- ❑ Le problème de la recherche d'optimisation étant un souci constant tout au long du processus d'ingénierie, nous donnons quelques éléments méthodologiques utiles à l'évaluation comparative des solutions : évaluation de l'efficacité, évaluation des coûts, prise en compte des risques.
- ❑ Enfin, nous avons choisi le problème de la sûreté de fonctionnement, crucial pour beaucoup de systèmes, afin d'illustrer l'importance des outils méthodologiques dans le domaine des spécialités. Nous en profitons pour étendre notre réflexion à la maîtrise des risques systèmes et introduire le concept émergent de résilience des systèmes.

Les chapitres 12, et 13 ont respectivement présenté les processus à mener et les méthodes pour les mener, reste à savoir maintenant les mettre efficacement en œuvre dans le contexte industriel. Cette mise en œuvre fait l'objet du chapitre 4.

La mise en œuvre efficace des processus et méthodes nous conduit à l'évidence à traiter des problématiques de management de l'IS dans différents contextes. La Figure 55 explicite ces problématiques.

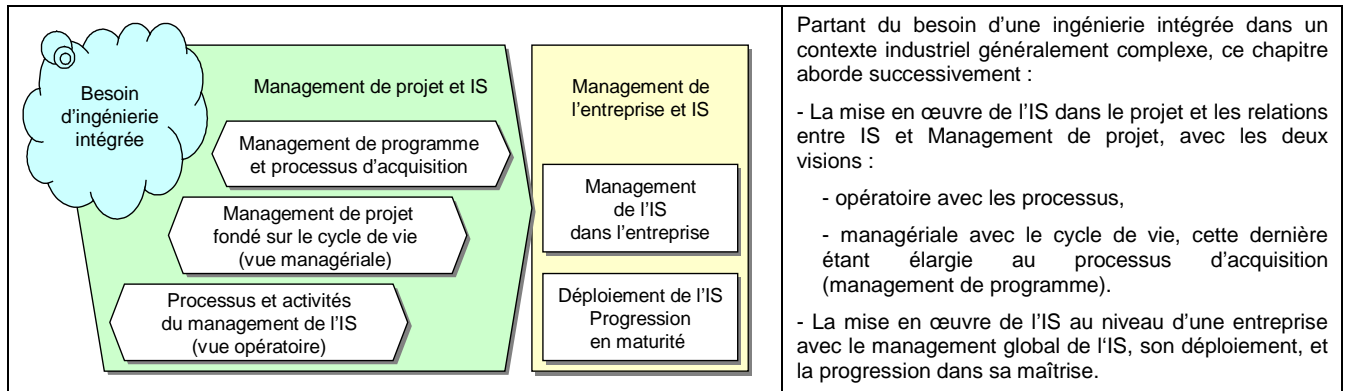


Figure 55 : La mise en œuvre de l'IS en contexte industriel

- ❑ L'efficacité impose une mise en œuvre de l'ingénierie traitant en parallèle de multiples activités dans un contexte pluridisciplinaire :
 - le même processus s'applique itérativement au système et à ses sous-systèmes,
 - il est parallélisée sur les différents sous-systèmes de même niveau,
 - il induit de multiples interactions et rétroactions susceptibles d'entraîner des reprises d'activités,
 - il prend en compte les produits contributeurs au cycle de vie du système (industrialisation de la production, déploiement, maintien en condition opérationnelle, retrait de service),
 - il met en jeu l'ensemble des disciplines concernées, ceci dans un contexte industriel multi-entreprises.
- ❑ Cette mise en œuvre intégrée se fait d'abord au niveau du projet. Le management de projet est approché selon le cycle PDCA, à partir de deux représentations : une représentation des concepts du management de projet, une représentation du management au cours du déroulement du projet. Elles mettent en évidence les rôles respectifs de l'IS et du management de projet tant dans la planification que dans la conduite du projet.
 - Les activités du management de projet dont la planification et la conduite des activités techniques d'ingénierie sont détaillées en suivant plus particulièrement la norme IEEE 1220. Cette vision « processus » met en évidence plus particulièrement les aspects opératoires du management de projet.
 - La maîtrise de ces multiples activités implique un cadrage managérial de niveau plus stratégique. Il est mené en relation avec le jalonnement du cycle de vie du projet. Nous l'illustrons avec le management conjoint par les acteurs concernés des phases d'obtention de la qualification de la définition, de la qualification industrielle et de la qualification opérationnelle d'un produit industriel.
 - Le cas des programmes, impliquant de multiples projets sur la durée, conduit à multiplier les niveaux de management et les bouclages entre ces niveaux afin de garantir, tout au long de la vie du programme la cohérence entre le programme et la politique de l'entreprise ainsi qu'entre le programme et les multiples projets dont il est constitué. Nous illustrons ces aspects sur le management du processus d'acquisition d'un système complexe.
- ❑ La bonne mise en œuvre de l'IS dans les projets d'une entreprise implique un management de l'IS au niveau de l'entreprise : c'est le rôle des processus d'entreprise de définir les processus applicables, de développer les ressources et de les partager entre les projets, de capitaliser sur les savoir-faire, etc. Ceci

ne se fait pas du jour au lendemain : le déploiement de l'IS dans l'entreprise est une opération de longue haleine qui consiste à mettre progressivement en place les processus d'IS et à les améliorer dans le cadre de projets de progression impliquant évaluation préalable, définition du plan de progression, mise en œuvre et évaluation du résultat. Ceci conduit à introduire les modèles de maturité.

11 L'IS : DEFINITION

L'ingénierie système est une démarche méthodologique coopérative et interdisciplinaire qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, développer, faire évoluer et vérifier un ensemble de produits, processus et compétences humaines apportant une solution économique et performante aux besoins des parties prenantes et acceptable par tous (inspirée de IEEE 1220). Cet ensemble est intégré en un système, dans un contexte de recherche d'équilibre et d'optimisation sur tout son cycle de vie.

On trouve dans cette approche de définition plusieurs éléments :

- ☐ Recherche globale de la maîtrise de la transformation d'un besoin opérationnel en une solution décrite par la configuration d'un système répondant à ce besoin. Cette recherche inclut tous les produits contributeurs au développement, au déploiement, à la vie opérationnelle et au retrait de service du système.
- ☐ Prise en compte de l'ensemble des éléments à considérer, tant du domaine du besoin à satisfaire que du domaine de la solution.
- ☐ Approche de résolution du problème dans un faisceau d'attentes et de contraintes émanant de toutes les parties prenantes, en cherchant à atteindre une solution optimisée sur tout le cycle de vie du système.
- ☐ Recherche d'efficacité globale : les activités d'ingénierie système font partie de l'optimisation globale. Elles sont planifiées et réalisées conformément à des critères d'efficacité mesurables ; les efforts de toutes les disciplines et spécialités d'ingénierie sont intégrés dans un tout cohérent conformément aux objectifs du projet.

Remarques complémentaires :

- ☐ Pour donner une description de l'IS, en tant que démarche méthodologique générique, on s'intéressera à ses **éléments invariants** (par rapport aux secteurs d'activité, aux types de problème, aux types de système-solution, aux types d'organisation industrielle, etc.). Ces invariants sont issus :
 - **de l'expérience** : On constate que certains types d'activité pour faire l'ingénierie d'un système sont invariants et peuvent faire l'objet de description sous forme de bonnes pratiques transposables d'un type de projet à un autre : c'est le domaine de la description des **processus**,
 - **de la science** : du fait que la solution se présente sous la forme d'un système, les théories scientifiques concernant les systèmes fournissent des invariants méthodologique fondamentaux : ils sont à la base de toutes les méthodes, notamment en ce qui concerne les aspects de modélisation et de simulation des systèmes. Ils ont des impacts sur les méthodes et outils de l'IS, mais également sur les approches d'environnement organisationnel de l'IS (rappelons que les programmes et projets sont des systèmes).

Ainsi peut-on parler d'ingénierie système dirigée par les processus (*Process Based Systems Engineering*) et d'ingénierie système dirigée par les modèles (*Model Based Systems Engineering*).

- ☐ L'IS n'est pas une nouvelle méthode qui viendrait remplacer telle ou telle autre méthode, mais une approche globale et systématique globale apte à mettre en cohérence les méthodes et démarches existantes, telles que l'analyse fonctionnelle, l'analyse de la valeur, la sûreté de fonctionnement, la conception à objectifs désignés, les méthodes d'ingénierie de spécialités ou de génie des métiers impliqués, etc, tout en bénéficiant de leurs retours d'expériences.

Pour la présenter, nous convenons de choisir trois axes d'analyse, à savoir :

- ☐ ses processus,
- ☐ ses méthodes,
- ☐ sa mise en œuvre.

Sachant que, compte tenu du caractère systémique de l'IS, ces trois axes ne correspondent pas à une partition de l'IS en trois éléments, mais à trois points de vue portés sur le système « Ingénierie Système ». Que l'on nous excuse pour les redondances et renvois générés par cette forme de présentation.

12 L'APPROCHE PROCESSUS

12.1 Présentation générale

En ingénierie système, tout projet implique la réalisation de divers types d'**activités** :

- ☐ activités techniques d'analyse du problème, de conception de la solution, d'intégration, de vérification et de validation,
- ☐ activités de management de ces activités techniques,
- ☐ activités de gestion des relations contractuelles entre clients et fournisseurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, sous-traitants).

Ces trois types d'activités sont respectivement regroupés en **processus techniques**, **processus de management** et **processus contractuels**. Les activités de support communes aux différents projets réalisés par une entreprise, forment une quatrième classe de processus : les **processus d'entreprise**.

Du fait de l'invariance des types d'activité à réaliser, ces processus sont considérés aujourd'hui comme des fondements génériques pour toute mise en œuvre de l'ingénierie système.

12.1.1 Définition et caractéristiques générales des processus

Définition : Un **processus** est un ensemble d'**activités** corrélées ou interactives qui transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie (produite, résultats).

Ce faisant,

- ☐ il répond à sa finalité (déclinée en objectifs de résultat ou produit),
- ☐ il est immergé dans un environnement donné,
- ☐ il est soumis à des contraintes et consomme des ressources.

La figure Figure 56 présente le schéma général d'un processus, désigné à l'AFIS sous le mnémonique de CPRET (contrainte, produit, ressource, entrées, transformation).

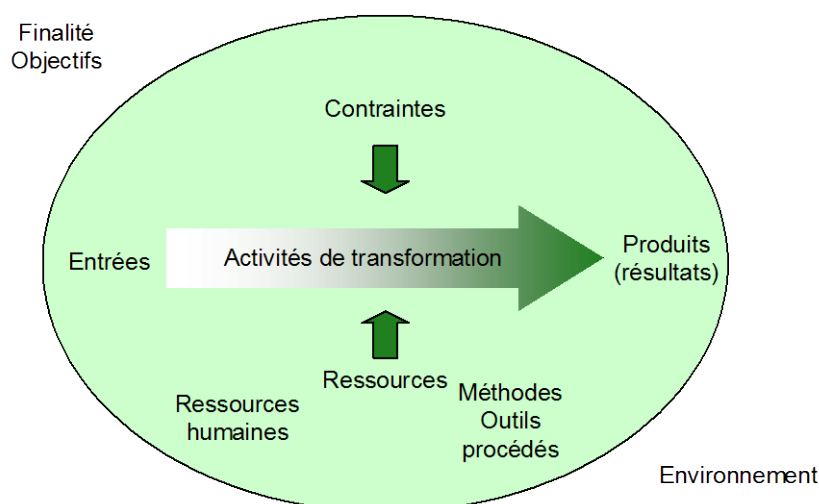


Figure 56 : Schéma général d'un processus

- ❑ **Un processus suit le cycle de la qualité PDCA** : planification, déroulement, contrôle, action corrective (cf. cycle PDCA : *Plan, Do, Check, Act*, ou cycle de Deming).

Le processus est planifié pour répondre au mieux à ses objectifs dans son environnement en tenant compte des contraintes imposées et des ressources disponibles. Sa mise en œuvre est suivie pour détecter les écarts entre le réalisé et le planifié, et maîtrisée autant que possible par des actions correctives visant à restaurer la conformité au plan.

- ❑ **Un processus est managé selon le cycle PDCA.** Le management consiste à planifier le processus, puis à conduire sa réalisation conformément au plan. Cette conduite consiste à :
 - lancer les activités en leur allouant les ressources nécessaires,
 - suivre en évaluant les écarts réel/planifié,
 - maîtriser en réagissant aux écarts constatés.

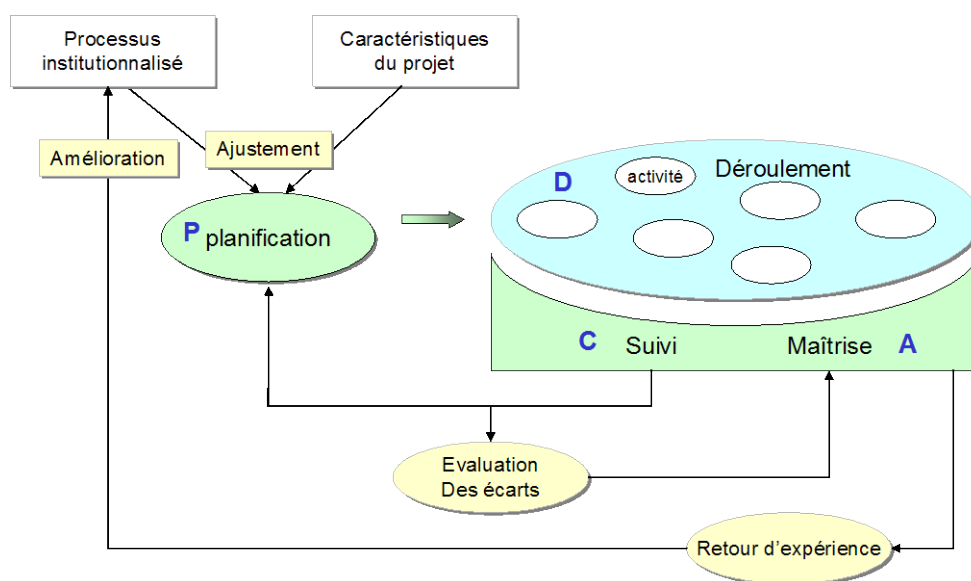


Figure 57 : Le cycle de qualité d'un processus

- ❑ **Les processus sont institutionnalisés, certains sont normalisés.**

L'aspect invariant des types d'activité à réaliser pour faire un système a conduit d'abord les organismes (entreprises, organismes publics) à institutionnaliser les processus ayant réussi, de manière à en exploiter les bonnes pratiques. Puis les instances de normalisation ont normalisé les pratiques communes aux organismes les plus avancées. Les entreprises peuvent alors définir ou re-définir leurs processus institutionnalisés pour assurer une cohérence avec les normes, bénéficiant ainsi de l'expérience commune et d'éléments de référentiel commun avec leurs partenaires.

On distingue ainsi :

- Les **processus normalisés** : ils sont définis dans des normes qui résultent d'un certain consensus entre des experts des organismes les plus avancées. Ils décrivent les types d'activités à réaliser et de résultats attendus de ces activités,
 - Les **processus institutionnalisés (ou définis) dans un organisme** : souvent inspirés d'une norme (ou éventuellement source d'inspiration d'une norme), ils intègrent les bonnes pratiques et les méthodes propres à l'organisme pour réaliser les activités.
- ❑ L'adaptation de processus génériques au contexte d'un projet conduit à la définition de **processus ajustés**.

L'ajustement d'un processus pour un projet donné est une adaptation d'un processus, normalisé ou institutionnalisé, aux justes besoins du projet. Cet ajustement est un des éléments de la planification du projet : les tâches techniques sont des adaptations d'activités des processus, appliquées à chacun des produits à réaliser. Rappelons que les processus ajustés, une fois planifiés, correspondent à la vision fonctionnelle du système-projet (ce qu'il fait) : un ensemble de tâches en interaction entre elles et avec l'environnement, coordonnées en vue de l'obtention de l'objectif du projet.

☐ Les processus institutionnalisés sont l'objet de **l'ingénierie des processus**

Cette ingénierie consiste à concevoir les processus à institutionnaliser, à les déployer et à les améliorer à partir des retours d'expérience et d'évaluations de leur mise en œuvre dans les projets. Elle est conduite pour répondre aux justes besoins de l'organisme en tenant compte des normes existantes et de l'expérience (projets réussis et échecs dans l'organisme).

Les processus d'ingénierie système s'appliquent ainsi à l'ingénierie des processus.

☐ Les processus font l'objet de **modélisation**

L'analyse et la conception des processus s'appuie sur des approches de modélisation fonctionnelles et comportementales analogues à celle des processus (procédés) techniques. Nous utilisons d'ailleurs tout au long de cet ouvrage des types de modèles décrits au chapitre 13.3 de cette partie 4 pour les représenter. Notons l'existence de formalismes spécifiques pour modéliser des processus d'un métier : la BPMN (Business Process Modeling Notation) de la BPMI (Business Process Management Initiative) de l'OMG (Object Management Group) en est un exemple.

☐ Les processus font l'objet d'**évaluation**

Pour améliorer les processus, il faut pouvoir les évaluer, donc les mesurer. On distingue deux types de mesures. Les mesures liées à l'**efficacité** du processus évaluant le résultat du processus par rapport à ses objectifs, et les mesures liées à l'**efficience** du processus évaluant le résultat du processus par rapport à sa consommation de ressources. Une des difficultés de l'évaluation des processus d'IS est que l'on ne peut faire de mesures que sur des projets, donc sur des processus ajustés, alors que l'on cherche à évaluer les processus institutionnalisés (par exemple pour améliorer leur **effectivité**, c'est-à-dire leur aptitude à répondre au mieux à leur finalité).

12.1.2 La maîtrise des processus, clé de la qualité

La qualité d'un système est traditionnellement définie par la satisfaction de ses utilisateurs, et, par extension, de l'ensemble de ses parties prenantes.

Son obtention suppose une bonne analyse du besoin, une traduction complète et cohérente de ces besoins en exigences, une définition optimisée d'une solution conforme à ces exigences et une réalisation du système (de ses exemplaires) conforme à sa définition. En bref, la qualité s'obtient par la bonne mise en œuvre des activités des processus d'ingénierie système, y compris les pratiques de vérification et validation qui assurent, tout au long du déroulement des processus, que les produits de leurs activités ont été bien faits et sont conformes aux besoins spécifiés.

Dans ce contexte, la qualité sous-tend l'ensemble du présent document, ce qui explique que nous ne lui dédions pas un chapitre spécifique, mais seulement quelques rappels.

La maîtrise de la qualité consiste donc à s'assurer que les processus et leurs bonnes pratiques sont bien définis, à contrôler qu'ils sont bien appliqués, et enfin, à les améliorer continûment. C'est ce qui fonde le système qualité au sens des normes ISO 9000-2005 (assurance qualité, contrôle qualité, amélioration de la qualité).

On a constaté que cette maîtrise des processus appliquée à un métier passe par différents niveaux de maturité, quelle que soit l'organisation qui l'exerce (voir 14.4.3.1) :

- ☐ **Réalisé** : les savoir-faire techniques nécessaires aux activités des processus techniques sont acquis. Le comportement de l'organisme repose sur des individus et apparaît artisanal.

- ☐ **Managé** : les processus sont managés selon le cycle « planification, réalisation, contrôle, action corrective ». Chaque projet maîtrise les activités qu'il doit conduire pour réussir ses développements. Le comportement est organisé.
- ☐ **Défini** : l'organisation a défini et institutionnalisé des processus standards qui sont ajustés aux besoins de chaque projet et améliorés au fil du temps, en se basant sur des données capitalisées. Le comportement est standardisé (stabilisé).
- ☐ **Maîtrisé quantitativement** : l'efficacité des processus est mesurée et des objectifs sur les processus sont fixés et mesurés au niveau des projets. Le comportement est rationalisé.
- ☐ **Optimisé** : l'amélioration continue des processus est rendue possible par le retour d'informations quantitatives des processus et par le pilotage des technologies et des innovations. Le changement est maîtrisé, le comportement est adaptatif (agile).

Ceci a conduit à définir des modèles de maturité par métiers, fondés sur cette échelle générale et sur les bonnes pratiques du métier. Ils fournissent aux organismes les modèles d'évaluation pour se positionner sur l'échelle de maturité et définir des plans de progrès. Le **CMMI**, *Capability Maturity Model – Integration*, proposé par le *Software Engineering Institute*, en est un exemple (voir 14.4.3).

Pour mémoire, notons aussi que les produits de l'ingénierie système doivent également se conformer à des normes de qualité liées au métier ou au secteur d'activité (électricité, mécanique, etc.).

En particulier, la difficulté de définir et mesurer la qualité des logiciels a conduit à définir des modèles de qualité et de qualimétrie du logiciel. Ils fournissent les caractéristiques de qualité, bases pour définir les besoins et exigences correspondantes, les critères pour concevoir en respectant les caractéristiques exigées, et enfin les métriques pour mesurer la qualité obtenue sur les caractéristiques. La norme ISO 9126 fournit ainsi une arborescence des caractéristiques de qualité attribuables à un logiciel, partiellement applicable au système.

12.1.3 Typologie des processus à considérer par l'IS

Trois normes générales d'ingénierie système décrivant les processus du métier d'IS sont actuellement disponibles. Elles définissent les types d'activité à réaliser et les types de résultats à produire.

Ce sont :

- ☐ **IEEE 1220** : Standard for application and Management of the Systems Engineering Process.
- ☐ **EIA/ANSI 632** : Processes for Engineering a System.
- ☐ **ISO 15288** : Systems and Software Engineering – System Life Cycle Processes.

Ces normes servent de référence à l'ensemble du présent document.

Certains secteurs d'activités ont défini des normes sectorielles, comme par exemple ISO TC20 ou ECSS-E 10A pour l'ingénierie spatiale. Elles apparaissent comme des adaptations des normes génériques aux besoins du secteur.

Elles peuvent être complétées par l'utilisation de normes et réglementations complémentaires concernant des domaines de processus particuliers (management de la qualité, gestion de projet, processus d'acquisition de systèmes complexes...), des technologies spécifiques (systèmes d'information, logiciel), des secteurs d'activité spécifiques...etc...

Les trois normes générales de l'IS recouvrent des champs différents, avec des niveaux d'approfondissement différents : en ce sens, elles se complètent. La Figure 58 compare :

- ☐ leurs domaines de couverture (axe horizontal des ellipses) en termes de types de processus (techniques, managériaux, contractuels, d'entreprise) et, pour ce qui concerne les processus techniques, en termes de phase du cycle de vie du système,
- ☐ leur niveau de détail de description des activités des processus (axe vertical des ellipses),

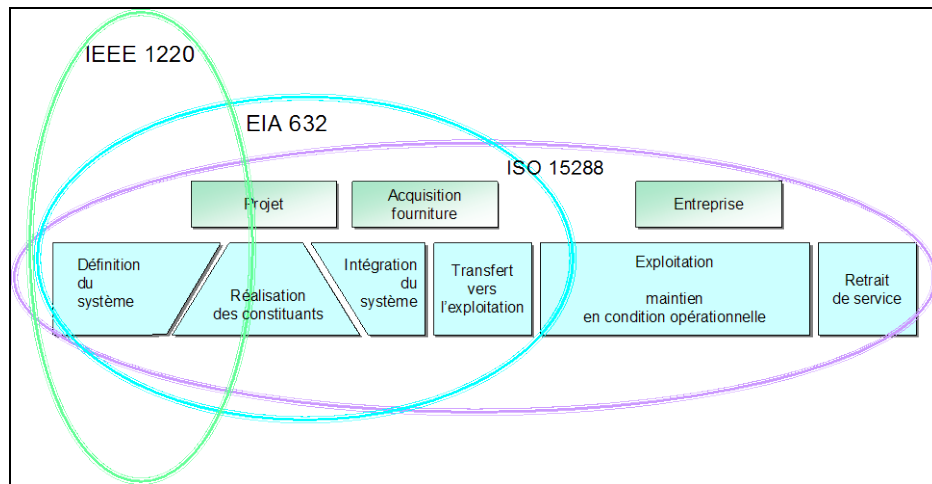


Figure 58 : Domaines couverts par les 3 normes générales d'IS

Les processus définis par les normes d'IS se classent en quatre groupes :

- ☐ **Les processus techniques** qui participent à la transformation des besoins en solution et à la vie opérationnelle des produits correspondants,
- ☐ **Les processus de management** (ou processus de projet) qui participent à la maîtrise des processus techniques dans le contexte du ou des projets (particulièrement de l'IS dans les projets),
- ☐ **Les processus contractuels** qui assurent les relations acquéreur-fournisseur (par exemple avec le client et les sous-traitants pour un projet dans une entreprise),
- ☐ **Les processus d'entreprise** qui ont pour rôle de développer le potentiel en IS de l'entreprise en manageant les domaines communs aux différents projets d'IS.

12.2 Présentation de l'ensemble des processus du cycle de vie du système

Nous nous proposons, dans ce chapitre, de présenter succinctement les quatre groupes de processus d'IS en adoptant une approche qui en facilite la compréhension (quitte à nous éloigner quelquefois de la lettre des normes). Nous nous référons plus particulièrement à la norme ISO 15288, la plus englobante de manière à avoir une vue générale.

La Figure 59 présente la cartographie des processus de la norme ISO 15288 version 2008. Cette représentation met en évidence les quatre groupes de processus en adoptant le point de vue d'une entreprise participant à des projets d'IS, par exemple le systémier ou un sous-systèmeur (ses projets ont un client et des fournisseurs). Notons que la norme rajoute le processus d'ajustement qui a pour but d'adapter les processus de la norme aux besoins et aux circonstances spécifiques de son utilisation par un organisme.

A titre de comparaison, les Figure 60 et Figure 69 représentent respectivement les processus principaux des normes EIA 632 et IEE1220, selon leur présentation habituelle indiquant les relations principales entre processus.

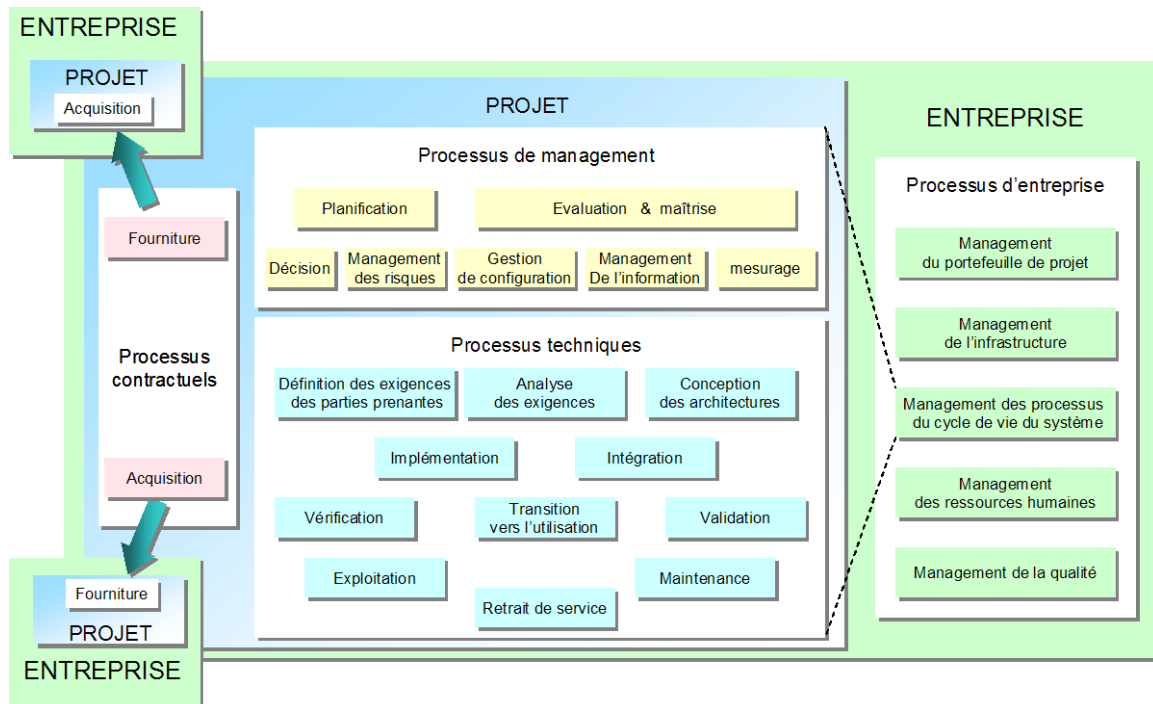


Figure 59 : Cartographie des processus du cycle de vie du système (ISO 15288)

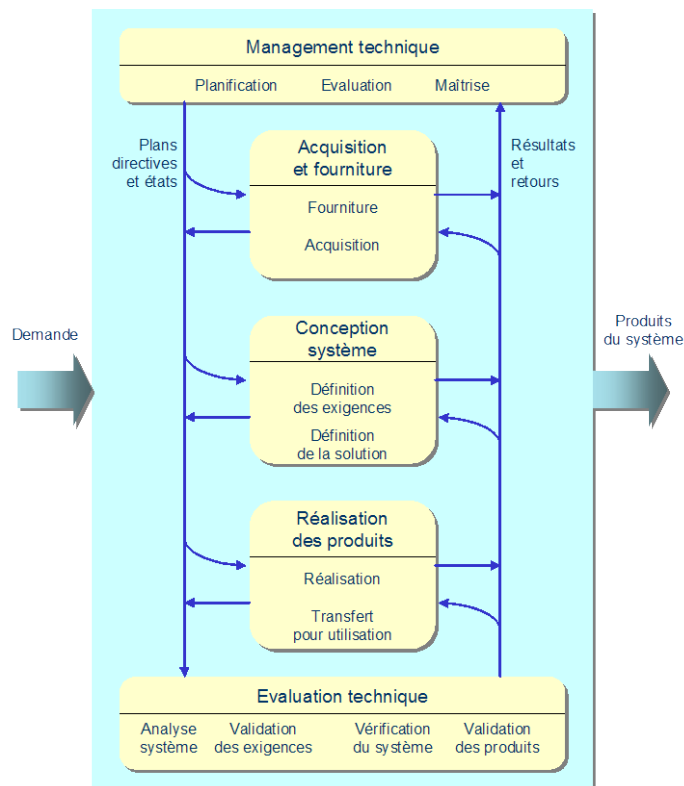


Figure 60 : Les processus de la norme EIA 632

Cette première présentation succincte de l'ensemble des processus, selon la classification de la norme 15288, sera approfondie :

- Dans le chapitre 12.3 pour ce qui concerne les processus techniques d'IS, qui correspondent au passage du besoin à la définition de la solution, en tenant compte notamment des autres normes (EIA 632 et surtout IEEE1220, de beaucoup la plus détaillée sur cette partie).
- Dans le chapitre 14 concernant la mise en œuvre de l'IS, pour ce qui concerne les processus de management de l'IS dans le projet et dans l'entreprise.

12.2.1 Les processus techniques

Nous distinguerons deux groupes de processus techniques selon qu'ils s'appliquent principalement à l'une ou l'autre des deux périodes du cycle de vie du système :

- ☐ Les **processus techniques de développement** : ils s'appliquent principalement à la période du cycle de vie du système qui précède la mise en service opérationnel (ces processus sont traités dans les trois normes).
- ☐ Les **processus techniques après mise en service** : ils s'appliquent principalement à la période du cycle de vie du système qui suit la mise en service opérationnel (ces processus ne sont traités que dans la norme ISO 15288).

Remarque : Les processus présentés ont un caractère très générique et peuvent se recouvrir dans le temps, en effet la frontière avant et après mise en service opérationnel n'est pas strictement tranchée :

- ✓ *une maintenance évolutive est susceptible de mettre en œuvre tout ou partie des processus de développement,*
- ✓ *le déploiement d'un système répétitif ou d'un réseau dure une bonne partie de la vie du système, à un instant donné certaines parties du système sont utilisées alors que d'autres ne le sont pas encore,*
- ✓ *les mêmes processus de développement sont traités à tous les niveaux avec des granularités différents : le maître d'ouvrage exécute à son niveau les processus d'ingénierie et d'intégration de son système global dans lequel doivent s'intégrer les différentes composantes dont il sous-traite le développement. Le maître d'œuvre ou son sous-traitant de rang N en font autant pour le système ou le constituant dont ils ont la charge.*

Le chapitre 12.3 suivant apporte des compléments aux éléments fournis dans le présent chapitre.

12.2.1.1 Les processus techniques de développement

La vision processus remplace l'ancienne approche par le cycle de vie (plus précisément le cycle de développement) généralement représenté en V (voir Figure 61) et qui comporte :

- ☐ une branche descendante de définition avec les activités de spécification (définition des exigences) et de conception architecturale,
- ☐ une branche remontante d'intégration avec les activités d'IVV (intégration, vérification, validation),
- ☐ et à l'intersection de ces deux branches, les activités d'acquisition ou développement/réalisation des composants.

Cette représentation a certes un caractère structurant (spécifier avant de concevoir, concevoir avant de réaliser, intégrer en fonction de la conception, vérifier en conformité aux exigences, valider en conformité aux besoins), mais reste théorique.

- ☐ Elle ne s'applique au mieux qu'au développement d'un système relativement simple, réalisé en un exemplaire. Elle n'est pas applicable au développement des systèmes complexes à multiples niveaux de décomposition, des systèmes de systèmes fédérant des systèmes existants, des systèmes à longue durée de vie en environnement évolutif, avec développement des évolutions pendant l'exploitation, des lignes de produits aux nombreuses variantes...

- ❑ Elle ne prend pas en compte le fait que les processus recouvrent les phases du cycle de vie, ainsi par exemple :
 - Le processus de V et V commence dès l'expression des besoins : ces derniers sont-ils valides ? saura-t-on vérifier leur obtention pour valider le système ?
 - Le processus d'analyse des besoins se continue pendant l'intégration, voire en phases d'exploitation, notamment pour les systèmes à missions et en environnements évolutifs...
- ❑ Elle ne prend pas en compte les aspects coopératifs et itératifs des processus : le processus de conception d'un constituant appelle le processus de définition des exigences de ses sous-constituants.

Le cycle de vie du développement (quelle que soit sa représentation) est donc trop dépendant des types de système et trop grossier pour décrire le développement des systèmes (nous verrons cependant que sa définition est essentielle pour la maîtrise managériale du projet).

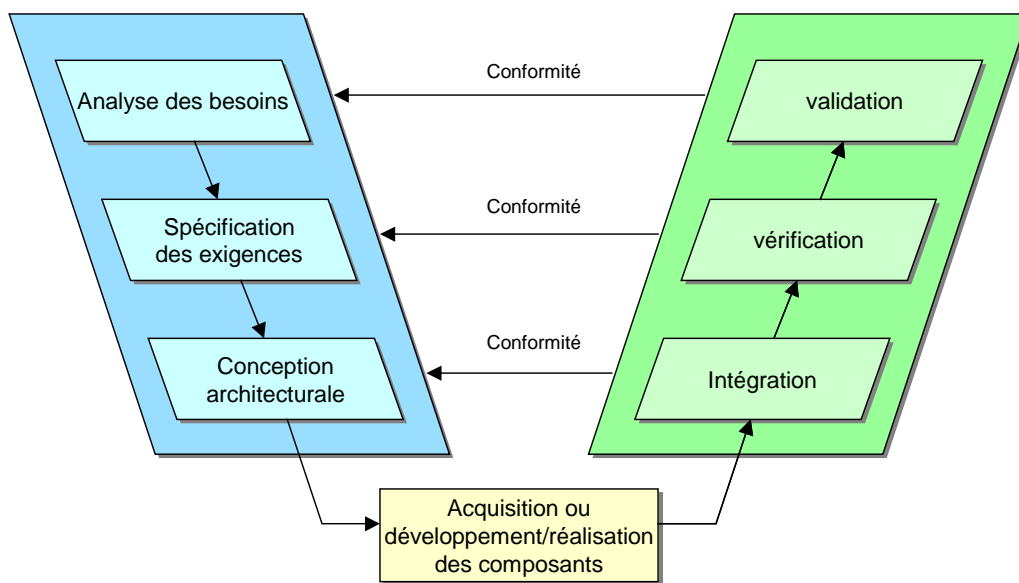


Figure 61 : les activités de développement selon le cycle en V (pour mémoire)

Constatant, par ailleurs, que l'on fait toujours les mêmes types d'activité pour développer les systèmes, c'est l'approche par les processus qui fournit les invariants aptes à formaliser le développement d'un système de manière générique. La Figure 62 propose une cartographie des processus techniques de développement d'un système. Cette représentation, qui se veut une synthèse des points de vue des trois normes citées au paragraphe 12.1.3, remplace celle du cycle en V.

On distingue :

- ❑ les processus techniques principaux :
 - processus de définition du système (définition des exigences et conception),
 - processus d'intégration du système.
- ❑ les processus d'évaluation et justification que l'on peut considérer, suivant les normes, soit comme intégrés dans les processus principaux précédents, soit comme processus de support génériques appelés par les processus principaux.

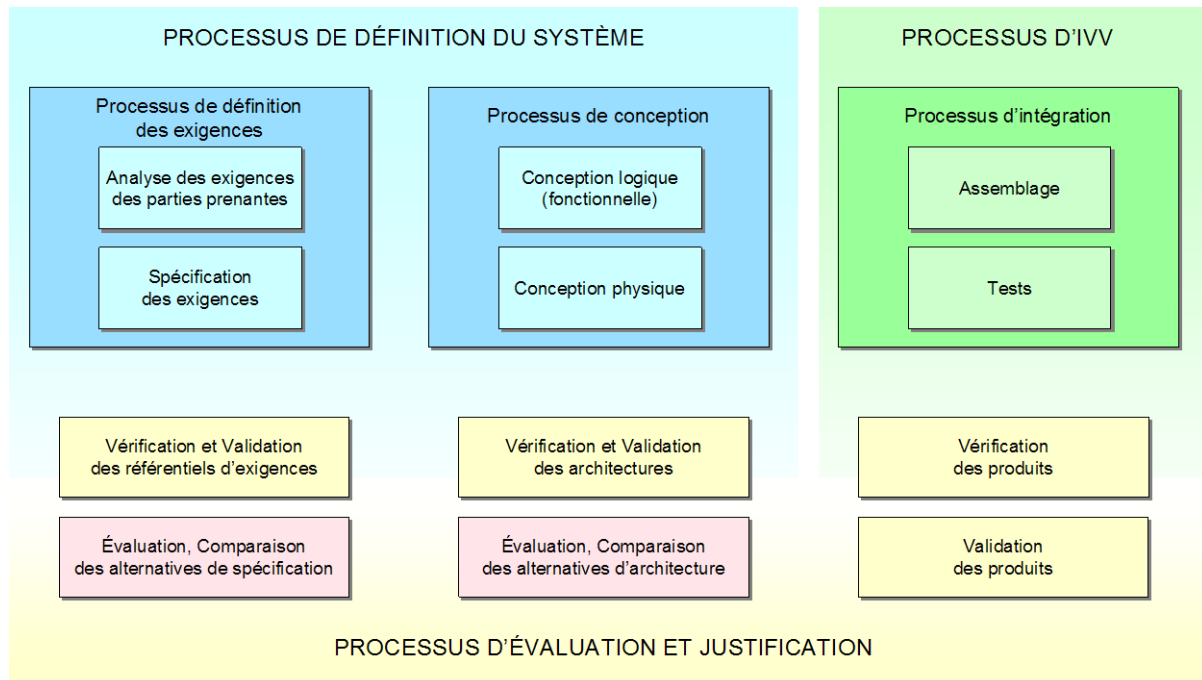


Figure 62 : Les processus techniques du développement

Ce double point de vue est adopté dans la présentation volontairement très succincte qui suit (une approche nettement plus détaillée est proposée en 12.3)

12.2.1.1.1 Le processus de définition du système

Le processus de définition du système comprend deux processus principaux :

- ☐ le **processus de définition des exigences** (cf. partie 2),
- ☐ le **processus de conception** (cf. partie 3, chapitre 8).

12.2.1.1.1.1 Le processus de définition des exigences

Le **processus de définition des exigences**, illustré Figure 63, part des besoins et contraintes des parties prenantes pour aboutir à une description du problème à résoudre sous la forme de la prescription (spécification) des exigences techniques que la solution devra respecter. Il se compose de deux sous-processus

- ☐ un **processus d'analyse des exigences des parties prenantes**, recueillant, analysant et formalisant leurs attentes et contraintes,
- ☐ un **processus de spécification des exigences**, prenant en compte les contraintes des autres parties prenantes (concernées par la réalisation), auxquelles devra satisfaire la solution pour rendre les services attendus.

Ces processus s'appuient sur les processus supports **d'évaluation et justification** des exigences :

- ☐ le **processus de vérification des référentiels d'exigences** a pour but de s'assurer qu'ils ont été « bien » conçus, selon les règles de l'art (voir Partie 2, 6.1.2)
- ☐ le **processus de validation des référentiels d'exigences** a pour but de s'assurer qu'ils sont conformes aux besoins, notamment en vérifiant la traçabilité avec les référentiels amont.

- ❑ le **processus d'évaluation-comparaison** en analyse des exigences, appliqué par exemple à la résolution des conflits entre exigences contradictoires, a pour but de s'assurer que les alternatives ont été analysées, et que les choix sont justifiés.

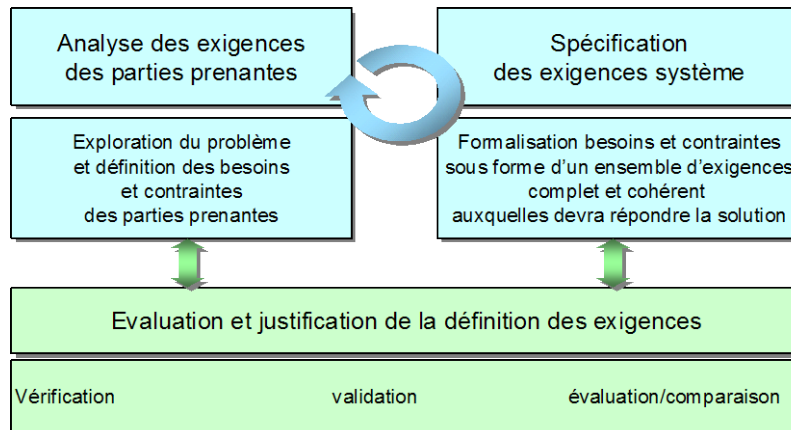


Figure 63 : Le processus de définition des exigences

12.2.1.1.1.2 Le processus de conception

Le **processus de conception** de la solution, illustré par la Figure 64, fournit un modèle constructif de la solution, sous forme d'une architecture de constituants conforme aux exigences techniques. Cette architecture est généralement conçue sous l'angle logique (fonctionnel) avant d'être finalisée par les choix physiques (architecture physique).

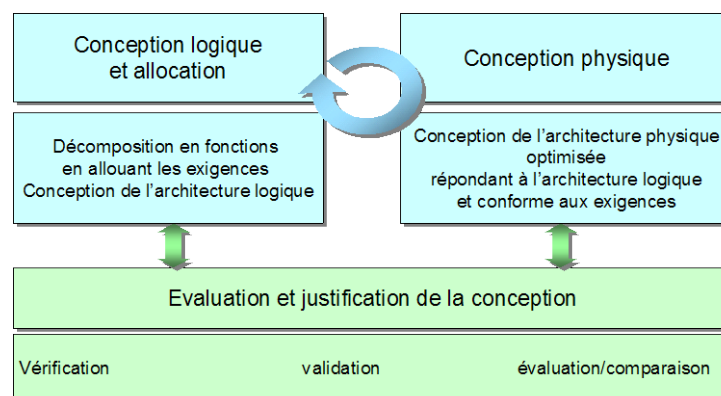


Figure 64 : Le processus de conception de la solution

Il se compose de deux sous-processus :

- ❑ un **processus de conception logique** (ou fonctionnelle) comprenant l'analyse fonctionnelle avec allocation des exigences aux fonctions et la conception d'une **architecture logique** répondant aux exigences,
- ❑ un **processus de conception physique** débouchant sur une **architecture physique** avec la spécification des exigences allouées aux constituants à développer ou acquérir, dont leurs exigences d'interfaces, ainsi que le plan d'intégration.

Ces processus s'appuient sur les processus supports **d'évaluation et justification** de la conception :

- ☐ le **processus de vérification des architectures** a pour but de s'assurer qu'elles ont été bien conçues,
- ☐ le **processus de validation des architectures** a pour but de s'assurer qu'elles sont conformes aux exigences,
- ☐ le **processus d'évaluation-comparaison d'architectures candidates**, a pour but de s'assurer que les alternatives ont été analysées et que les choix sont justifiés.

Les processus de définition sont utilisés aux différents niveaux de décomposition du système : le système, ses sous-systèmes, leurs constituants de différents rangs, jusqu'à la spécification des composants à acquérir ou à faire développer et réaliser. Voir Figure 37, Figure 46 et Figure 74.

Pour les composants, feuilles de l'arborescence de définition du système, on applique soit le processus de développement/réalisation (dit d'implémentation selon ISO 15288) soit le processus d'acquisition d'un composant.

Tout composant fait l'objet de validation avant d'être pris en compte dans le processus d'intégration.

Les processus de définition du système sont présentés de façon plus détaillée au chapitre 12.3.

12.2.1.1.2 Le processus d'IVV (intégration, vérification, validation)

Le **processus d'IVV**, comprend le processus d'intégration du système à partir de ses constituants et les processus de vérification et de validation des « produits » obtenus.

- ☐ Le **processus d'intégration** consiste à assembler progressivement selon un processus systématique défini par le plan d'intégration, les constituants dûment vérifiés et validés, en faisant à chaque étape les tests et essais programmés.
Ce processus s'appuie sur les processus supports d'évaluation et justification. Tout produit résultant d'une opération d'intégration fait ainsi l'objet de vérification et de validation.
- ☐ Le **processus de vérification du produit** a pour objectif de s'assurer que le produit est conforme à ses exigences techniques de réalisation.
- ☐ Le **processus de validation du produit** a pour objectif de s'assurer que le produit est conforme aux exigences qui lui ont été allouées par le niveau supérieur.

Les processus d'intégration, vérification, validation sont utilisés aux différents niveaux de décomposition du système : les constituants de plus bas niveaux, les sous-systèmes et, *in fine*, le système lui-même (voir Figure 74).

Notons que le processus d'IVV construit :

- ☐ dans le cas d'un système unique, le produit-système lui-même,
- ☐ dans le cas d'un système répétitif, les éléments de preuve de l'opérationnalité du système permettant la qualification de sa définition (par exemple par l'exploitation réelle ou simulée d'un ou de plusieurs prototypes), et donc l'autorisation de passer en phase d'industrialisation ou de production de série.

12.2.1.1.3 Synthèse des objectifs des processus d'évaluation et justification

Les activités de processus techniques sont évaluées tout au long du développement afin de justifier de la bonne définition/intégration du système. Les paragraphes 12.2.1.1.1 et 12.2.1.1.2 ont présenté l'application de ces processus support aux divers processus techniques, ce paragraphe en résume les objectifs globaux :

- ☐ Les **processus de vérification** ont pour objectif de s'assurer que les activités techniques sont bien faites, sans introduire d'erreur : on justifie que l'on définit bien le système.

- ❑ Les **processus de validation** ont pour objectif de s'assurer que les activités répondent à leurs objectifs, que leurs produits répondent aux besoins : on justifie que l'on définit le bon système, au sens de celui qui répond aux besoins.
- ❑ Les **processus d'évaluation-comparaison** ont pour objectif de s'assurer que les problèmes et solutions alternatives sont analysés, et que les choix sont justifiés : on justifie que l'on converge vers une définition optimisée (à défaut de pouvoir dire que c'est la solution optimale).

La V & V ainsi que la comparaison des solutions alternatives sont des activités de base de tout ingénieur. Si on les a érigées en processus, c'est pour les formaliser et garantir leur mise en œuvre systématique, notamment pour s'assurer, pour ce qui concerne la comparaison des alternatives, que les choix sont faits dans le contexte multidisciplinaire adéquat pour en prévoir les différents impacts discriminants.

Ces processus sont ainsi « appelés » par les activités techniques principales : toute activité doit faire l'objet de vérification et de validation, tout problème apparaissant (conflit d'exigence, alternative de solution) implique une justification du choix.

Remarque : cet appel de processus n'implique nullement un changement d'acteur. On peut tout aussi bien décider de faire faire les activités d'évaluation par l'équipe qui a en charge l'activité principale (évaluer ce qu'il fait est le propre de l'ingénieur), que par des équipes indépendantes (ce qui permet souvent de mettre en évidence des impasses non intentionnelles du concepteur). Rappelons ici que les processus décrivent les activités à faire non l'organisation pour les faire.

12.2.1.2 Les processus techniques après mise en service

Ils concernent la période du cycle de vie du système qui s'étend de sa mise en service jusqu'à son retrait de service.

On y trouve les processus suivants :

- ❑ **Processus de transition vers l'utilisation.** Ce processus a pour objectif de mettre en exploitation le système dûment vérifié et intégré dans son environnement, avec mise en place des systèmes contributeurs utiles à cette exploitation, de manière à montrer sa capacité à fournir les services opérationnels attendus par les parties prenantes.

A ce titre, il apparaît comme un processus charnière entre développement et exploitation qui achève, dans le cas des systèmes uniques ou du prototype de qualification d'un système répétitif, le processus d'IVV en permettant la validation finale ou qualification opérationnelle du système. Dans le cas d'un système répétitif ou déployé, comme par exemple d'un réseau dont la couverture s'étend dans le temps, ce processus est repris à la mise en service de chaque nouvel exemplaire.

Ce processus comprend de multiples activités techniques dont certaines en liaison avec les processus contractuels, par exemple :

- la mise à disposition du système auprès de ses utilisateurs,
- les vérifications d'aptitude entraînant le transfert de propriété,
- la formation des acteurs d'exploitation et maintien en condition opérationnelle,
- la mise en place de processus qui permettront le suivi et les retours d'expériences,
- la vérification d'aptitude du système de soutien,
- une pré-exploitation avant autorisation d'exploitation régulière,
- les vérifications de service régulier pendant la période de garantie.

- ❑ **Processus d'exploitation.** Ce processus réalise l'exploitation du système dans les différents contextes d'emploi et manage les changements de contextes,
- ❑ **Processus de maintien en condition opérationnelle.** Ce processus intègre la mise en œuvre de l'ensemble des activités du soutien logistique, voir partie 3 : 4.4.3.
- ❑ **Processus de retrait de service.** Ce processus inclut l'arrêt d'exploitation, le démantèlement (installations nucléaires, chimiques, biologiques), les recyclages, dont la réutilisation de parties du système pour d'autres usages, et le traitements de déchets.

12.2.2 Les processus de management (de projet)

Les activités de management de projet ont pour but de piloter et supporter les autres activités du projet, notamment techniques. Elles sont organisées en processus. Ces processus sont formalisés dans des normes ou standard généraux (Norme ISO 10006, lignes directrices pour la qualité du management de projet - Project Management Book of Knowledge PMBOK), et adaptés à l'IS dans le cadre des normes spécifiques à l'IS (par exemple processus de projet dans la norme ISO 15288, processus de management de l'IS dans le guide RG.Aéro 77).

12.2.2.1 Le processus générique de management de projet

Au sein des normes générales (ISO 10006), le management de projet est décrit de manière générique comme l'application d'un processus général de management aux domaines traditionnels du management de projet.

- ❑ Le **processus général de management** de projet est fondé sur le cycle PDCA (voir Figure 57) de management des processus. Il est ici appliqué au projet considéré comme un processus. Voici les trois (sous)-processus de management qui découlent des quatre points du cycle PDCA (Cf. Figure 65).
 - Plan : **processus de planification** du projet,
 - Do : réalisation des activités techniques selon le plan,
 - Control : **processus de suivi** incluant l'évaluation des écarts par rapport au plan,
 - Act : **Processus de maîtrise** correspondant aux actions pour maîtriser les écarts constatés. (dans la version 2008 de la norme ISO15288, ces deux derniers processus ont été regroupés).
- ❑ Les **domaines du management de projet** à prendre en compte sont, outre la coordination globale (qui a un aspect intégrateur des autres domaines), le management du contenu (les tâches), le management des coûts, le management des délais, le management des moyens, le management de la qualité, le management des ressources humaines, le management des risques, le management des données, le management de l'information et de la communication, le management des aspects contractuels et de la réglementation applicable, ainsi que le management des sous-traitances (Cf. Figure 65).

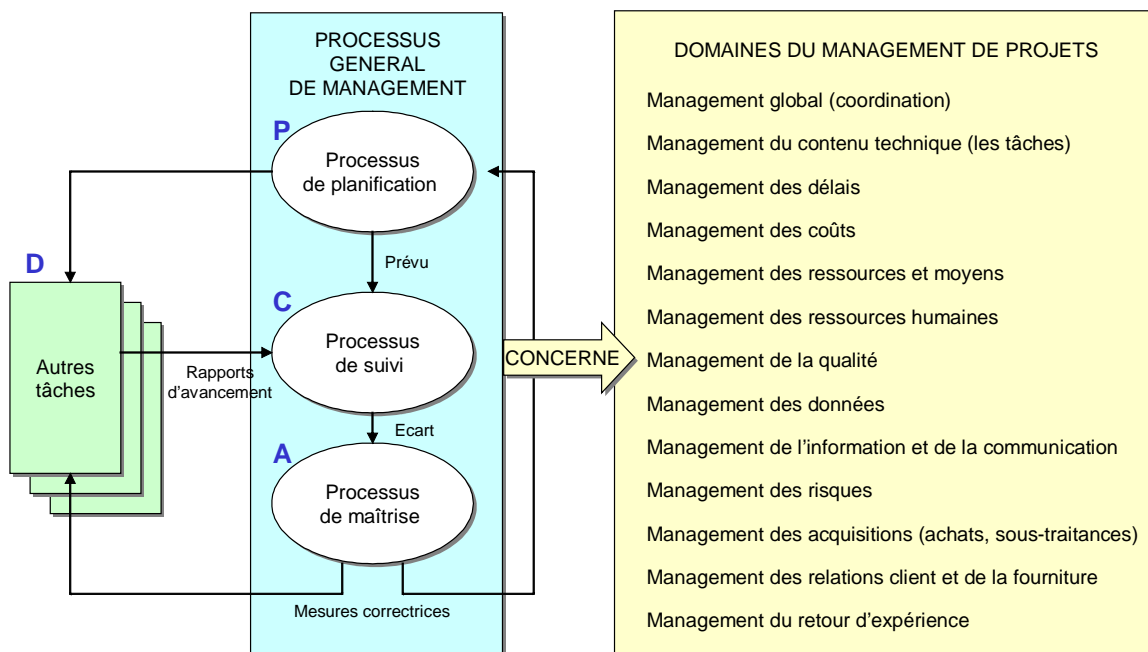


Figure 65 : Le processus général de management de projet

Notons que ce processus général est appliqué à différents niveaux de pilotage. Pour un projet, on distingue souvent trois niveaux :

- ❑ **Le pilotage stratégique** jalonné par les phases du cycle de vie du projet. Aux jalons programmés, généralement en fin de phase, les décisions de poursuite, de réorientation ou d'arrêt du projet sont prises :
 - en fonction de l'évolution de l'environnement et des objectifs du projet,
 - en fonction de l'avancement et des risques du projet respectivement évalués et estimés lors de revues de projet.
- ❑ **Le pilotage opératoire.** Il s'agit de application du processus générique de management aux différents domaines du projet, dans le cadre fixé par le niveau stratégique.
- ❑ **La régulation des tâches techniques.** Il s'agit de conduire ces tâches dans le cadre fixé par le niveau opératoire.

12.2.2.2 Les processus de management plus spécifiques de l'IS

La recherche de maîtrise de la complexité des systèmes et des projets pour les faire a des impacts forts sur l'ensemble des domaines traditionnels du management de projet mais conduit à en mettre certains en exergue, voire à en créer des spécifiques comme la gestion de configuration.

Ainsi, parmi les processus de management, la norme ISO 15288 insiste sur quatre processus clé pour la réussite en IS, voir la Figure 59 :

- ❑ **Processus de décision.** Son objectif est de faire les meilleurs choix pour le projet lorsque des alternatives se présentent et/ou que des arbitrages doivent être faits.

Il s'agit de prendre les décisions en connaissance de cause, à partir d'une analyse des différents choix envisageables, de leurs conséquences sur tous les aspects système (projet, cycle de vie, environnements, etc), ainsi que des risques qui y sont associés, mais aussi en fonction de la stratégie de l'entreprise (ou des entreprises) concernée(s) par la décision,

Les décisions prises sont dûment enregistrées et justifiées afin d'être prises en compte lors de nouvelles décisions notamment de remises en cause.

Rappelons que la recherche et l'évaluation des solutions alternatives pour le système font partie du processus technique d'évaluation-comparaison (cf. chapitre 12.3.2.2) : leurs résultats sont analysés et pris en compte dans le processus managérial de décision.

Cette séparation entre processus technique de préparation de la décision et processus managérial de décision est importante. La préparation de la décision (processus d'évaluation-comparaison) se fait généralement dans une recherche d'optimisation centrée sur le système et son cycle de vie, la décision prend également en compte des considérations de stratégie d'entreprise.

Un cas typique est le choix entre faire, partager, faire-faire (MAKE-TEAM-BUY) concernant le développement d'un constituant dont la décision revient (sous réserve de contrainte de niveau plus global) à l'entité responsable du constituant de rang supérieur :

- *Faire, par exemple pour conserver ou ne pas divulguer une compétence jugée stratégique pour l'avenir de l'entité,*
- *Partager, par exemple mettre en commun avec un partenaire les équipes de R & D pour développer un nouvel équipement fondé sur une technologie novatrice en vue de partager, les coûts de développement et les risques associés,*
- *Faire-faire (acquérir, sous-traiter), par exemple sous-traiter à une entreprise spécialisée pour bénéficier de son savoir-faire dû à ses investissements antérieurs.*

- ❑ **Processus de management des risques.** Son objectif est de limiter les probabilités d'occurrence et les conséquences d'événements incertains qui pourraient affecter le système ou le projet.

Le processus identifie et estime les risques, définit les parades et leurs conditions de déclenchement, suit les risques (nouveaux risques, évolution des risques identifiés et des risques résiduels après parade) met en œuvre et suit les parades, ceci pendant tout le cycle de vie du système.

- ❑ **Processus de gestion de la configuration.** Son objet est de maintenir l'intégrité et la cohérence de toutes les entrées et sorties identifiées d'un projet ou d'un processus, et de les rendre disponibles pour toutes les parties concernées.

Le processus identifie, enregistre, maîtrise, audite et rend disponible la configuration. Il garantit ainsi la cohérence de la définition du système, la conformité de ses exemplaires et la maîtrise de leur évolution tout au long de la vie du système.

- ❑ **Processus de management de l'information.** Son objet est de fournir aux parties concernées des informations pertinentes, à jour, complètes, valides et, le cas échéant, sécurisées, durant le cycle de vie et même, si nécessaire, au-delà de celui-ci.

Le processus crée, collecte, transforme, retient, met à disposition, dissémine et détruit des informations. Il manage les informations désignées, qu'elles soient techniques ou relatives au projet, à l'entreprise, au contrat ou à l'utilisateur.

12.2.3 Les processus contractuels

Un projet résulte de la coopération de multiples acteurs : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, sous-traitants, équipementiers, fournisseurs de divers types. Un acteur peut lui-même résulter d'un partenariat entre entreprises. Il est nécessaire de définir et contractualiser les obligations respectives des acteurs ou entités concernés par une collaboration.

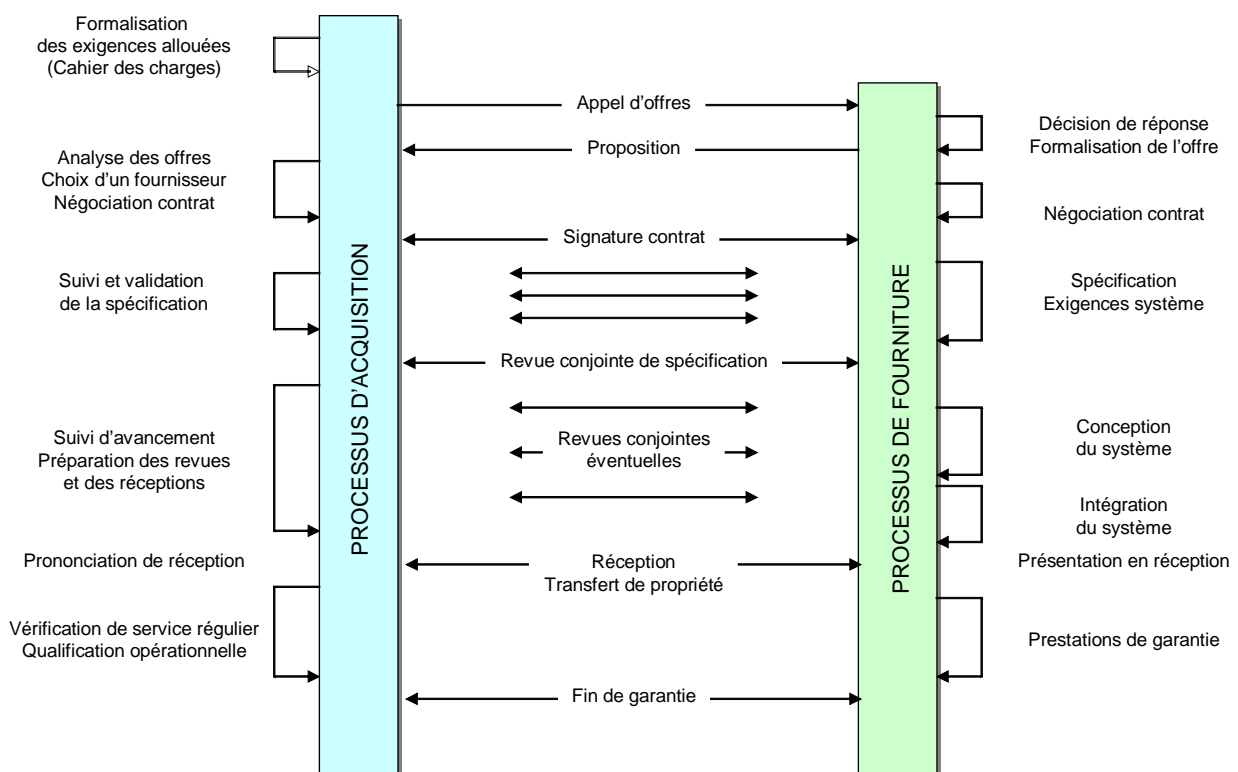


Figure 66 : Exemple de processus contractuels (cas d'un système unique)

La plupart de ces collaborations s'analysent en termes de relations de type acquéreur-fournisseur. Les **processus contractuels** ont pour objet de décrire les activités respectives de l'acquéreur et du fournisseur sous forme de deux processus corrélés :

- ☐ le **processus contractuel d'acquisition** mené par l'acquéreur,
- ☐ le **processus contractuel de fourniture** mené par le fournisseur.

Les conditions et obligations réciproques relatives à une relation acquéreur-fournisseur particulière sont stipulées dans un contrat (ou une convention s'ils appartiennent à la même entité juridique).

12.2.3.1 Le processus contractuel d'acquisition

Ce processus a pour objet d'obtenir un produit ou service qui réponde aux exigences de l'acquéreur. Il définit les activités nécessaires à l'établissement d'un contrat d'acquisition, au management du processus d'acquisition, à la réception des produits et services livrés par le fournisseur. Il comprend les activités suivantes :

- ☐ Approche stratégique de l'acquisition :
 - définition de la stratégie d'acquisition en fonction de la politique de l'organisme,
 - Identification, qualification des fournisseurs,
 - planification des acquisitions.
- ☐ Préparation d'un contrat :
 - préparation de l'appel d'offres ou de la consultation,
 - sélection des fournisseurs à consulter,
 - évaluation des offres,
 - choix d'un fournisseur,
 - négociation et établissement du contrat.
- ☐ Suivi et clôture d'un contrat :
 - suivi des coûts, performances et risques,
 - évaluation des impacts des événements indésirables,
 - inspections, évaluations et tests des produits et services livrés pour vérifier leur conformité aux termes du contrat,
 - règlement des conflits selon les procédures contractuelles,
 - négociation d'éventuels avenants au contrat,
 - prononciation des réceptions.

Remarque : ne pas confondre le processus contractuel d'acquisition applicable à une relation particulière client-fournisseur, avec le processus d'acquisition d'un système complexe qui englobe l'ensemble des processus d'ingénierie réalisés au cours de la vie du système selon la vue de l'acquéreur (voir chapitre 14.3.4).

12.2.3.2 Le processus contractuel de fourniture

Ce processus a pour objet de fournir un produit ou un service qui satisfasse aux exigences contractuelles. Il définit les activités nécessaires à l'établissement du contrat de fourniture, au management du processus de fourniture, à l'assurance que les produits et services fournis sont acceptables par l'acquéreur.

Il comprend les principaux types d'activités suivantes :

- ☐ Approche de la stratégie de fourniture :
 - obtention des avis d'appel d'offres ou de consultation,
 - analyse du contexte technico-commercial des appels d'offres et consultations,
 - décision de répondre en fonction de la politique commerciale et de la stratégie de l'entreprise.
- ☐ Préparation d'un contrat :
 - planification de la préparation de la réponse,

- préparation et présentation de la proposition,
- négociation du contrat.

❑ Réalisation d'un contrat :

- exécution du projet en conformité aux exigences spécifiées et aux conditions contractuelles,
- suivi d'avancement contractuel fournissant, aux principaux jalons, l'état du projet avec identification des risques portant sur la tenue des exigences, des délais de livraison et l'estimation des coûts du reste à faire,
- suivi continu du contrat, assurant que l'acquéreur répond à ses propres obligations contractuelles,
- négociation d'éventuels avenants au contrat,,
- livraison des produits et services dûment vérifiés et installés et de leurs tests de réception selon les obligations contractuelles.

Le principe de revues communes placées aux principaux jalons contractuels, réalisées par une équipe de revue indépendante des hiérarchies du projet chez l'acquéreur comme chez le fournisseur et donnant ainsi une vision objective de l'état du projet et des risques, permet un pilotage stratégique commun du projet.

12.2.4 Les processus d'entreprise

Les processus d'entreprise ont pour objet de fournir les supports nécessaires aux projets menés dans l'entreprise (l'organisme) et une aide à la décision pour le respect des objectifs de l'entreprise et des contrats établis.

Ils répondent notamment aux besoins de développement de l'entreprise, de constitution et de management du potentiel de ressources communes nécessaires aux projets, de coordination inter-projets et, in fine, de management de l'IS dans l'entreprise.

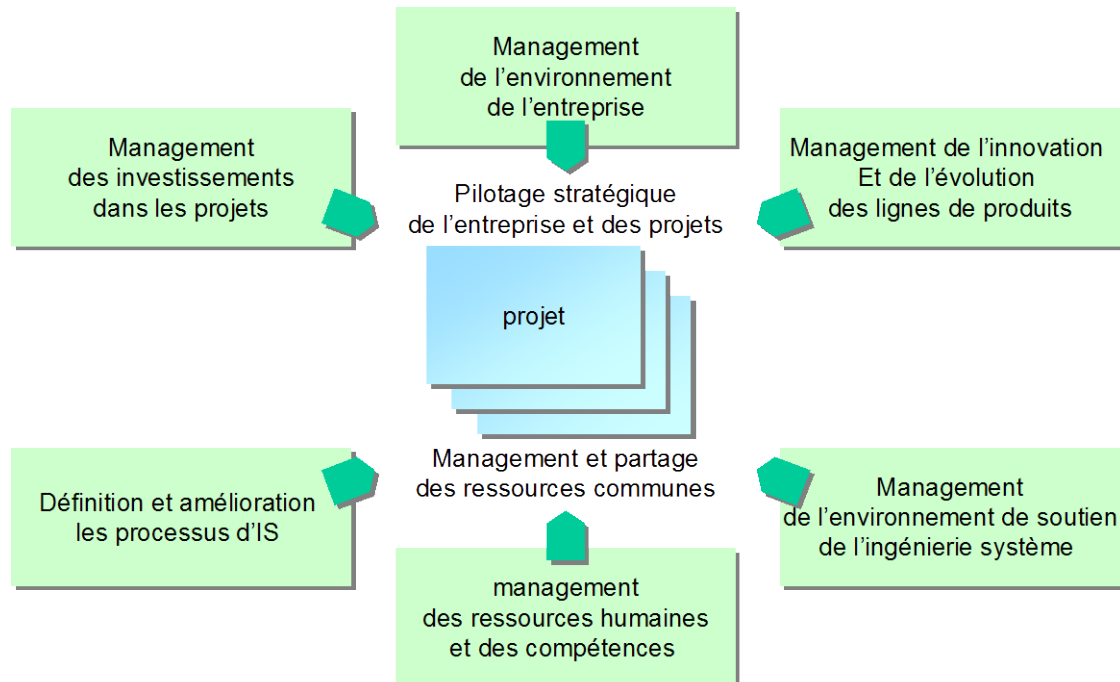


Figure 67 : Synthèse sur le rôle des processus d'entreprises

La liste des processus d'entreprise présentés sur la Figure 67 est proche de la norme ISO 15288, (voir Figure 59) et tient compte des apports des modèles de maturité.

On distingue :

- ❑ Des processus liés au pilotage stratégique de l'entreprise et des projets, tels que :
 - **Processus de management de l'environnement de l'entreprise.** Il définit et maintient les règles et les procédures de conduite des affaires de l'organisme du ressort de l'IS (ISO 15288-2002, regroupé avec le processus de management des processus dans ISO 15288-2008).
 - **Processus de management de l'investissement dans les projets.** Il lance et maintient des projets adéquats en nombre et en qualité et gère les investissements correspondants pour atteindre les objectifs de l'organisme (ISO15288-2002, devenu processus de management du portefeuille de projets dans ISO 15288-2008).
 - **Processus de management de l'innovation et de l'évolution des lignes de produits** (issu des modèles de maturité).
- ❑ Des processus de management et partage des ressources :
 - **Processus de management des processus (des cycles de vie des systèmes).** Il garantit que l'organisme dispose de processus institutionnalisés efficaces et cohérents avec les buts et les politiques de l'organisation (ISO 15288-2002, devenu processus de management des modèles de cycle de vie des systèmes en intégrant l'aspect management de l'environnement de l'entreprise dans ISO 15288-2008).
 - **Processus de management des ressources humaines** . Il assure la disponibilité des ressources humaines (compétences) pour que l'organisme et ses projets atteignent leurs objectifs.
 - **Processus de management des infrastructures.** Il développe et maintient les infrastructures et services nécessaires aux projets.
- ❑ Le **processus de Management de la Qualité**. Son objet est d'assurer que les produits, services et processus du cycle de vie satisfont les objectifs qualité à la fois de l'organisme et de ses clients.

12.3 Compléments sur les processus techniques

12.3.1 Compléments sur les processus de définition du système

Ce chapitre a pour objectif de donner une présentation détaillée des processus d'ingénierie conduisant à la définition du système (voir leur introduction au chapitre 12.2.1.1.1).

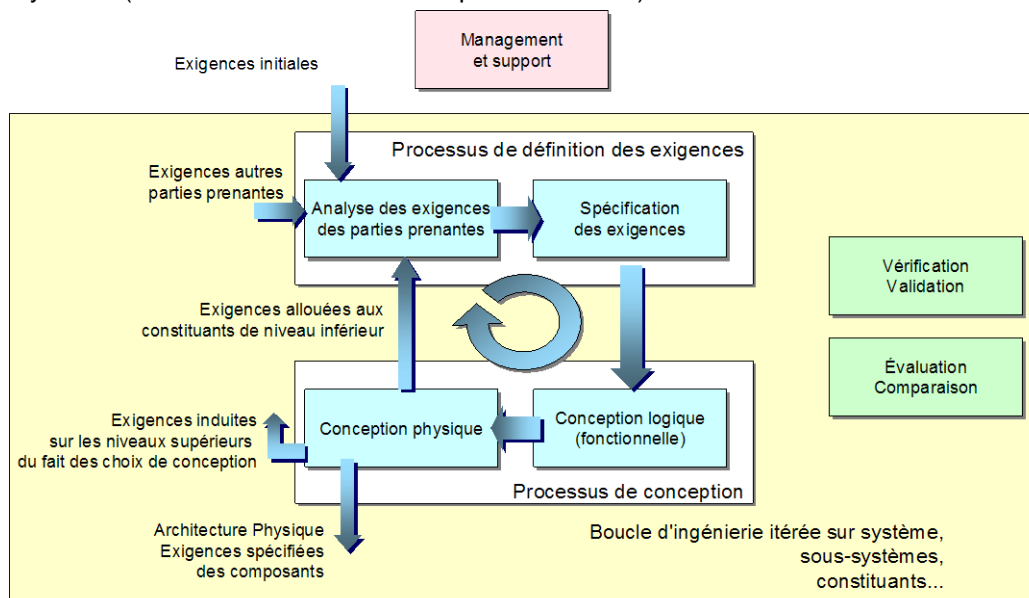


Figure 68 : Vision synthétique des processus d'ingénierie : la boucle d'ingénierie

La Figure 68 en donne une vision selon une abstraction en boucle temporelle complétant la vision de la Figure 62 qui synthétise les trois normes d'IS.

Nous présentons ces processus sous la forme d'une « **boucle d'ingénierie** ». Ce terme est ici utilisé pour marquer d'une part les fortes interactions entre les processus de la boucle, d'autre part les itérations de l'ensemble de la boucle sur le système, ses sous-systèmes, les constituants des sous-systèmes, etc.

Mise en œuvre des processus de la boucle d'ingénierie

Les processus de la boucle d'ingénierie s'enchaînent logiquement : on analyse les besoins et contraintes des parties prenantes avant de spécifier les exigences système, on spécifie ces exigences avant de concevoir une solution fonctionnelle y répondant, on conçoit la solution fonctionnelle avant de faire les choix technologiques d'organes pour réaliser les fonctions. Néanmoins, ces processus sont fortement imbriqués :

- ❑ Les processus de définition des exigences et de conception ne sont pas indépendants :
 - On ne spécifie (alloue) pas des exigences sans prendre en compte l'existant conceptuel (modèles architecturaux, par exemple), les possibilités technologiques disponibles ou émergentes, les produits du marché, l'état de l'art, voire des hypothèses de solution.
 - Inversement les choix de conception induisent de nouvelles exigences susceptibles d'avoir des impacts sur d'autres éléments du système.

La démarche globale est donc à la fois descendante : prescrire avant de construire, et ascendante : voir ce qui existe et peut être construit pour prescrire de façon exhaustive et à bon escient.

- ❑ Les processus de la boucle d'ingénierie s'appliquent itérativement sur le système, ses sous-systèmes et de façon générale sur leurs constituants (blocs constitutifs) de différents niveaux.
 - Les processus sont mis en œuvre en parallèle pour les constituants de même niveau de décomposition, impliquant ainsi des vérifications croisées de cohérence entre les instances de mise en œuvre de la boucle à ce niveau,
 - Des choix de conception concernant un constituant peuvent générer des exigences induites susceptibles d'avoir des impacts sur les constituants de niveau supérieur, et donc conduire à des rétroactions sur le processus de spécification/conception de ces constituants de niveau supérieur, voire sur ceux du système.
- ❑ La maîtrise de cette mise en œuvre itérative et parallèle des processus de la boucle d'ingénierie implique de forts besoins de coordination (voir partie 4 chapitres 14.2 et 14.3.2) :
 - Coordination technique. Elle a pour but de garantir la cohérence des activités réalisés par les différents acteurs et des choix techniques, de manière à acquérir la définition du système certes par affinement progressif, mais en anticipant et faisant, autant que possible, les bons choix du premier coup, évitant ainsi les rétroactions causes de réfections pénalisantes en coûts et délais. C'est le rôle du management de l'IS souvent incarné par l'architecte système assisté d'une équipe intégrée d'ingénierie apportant l'ensemble des disciplines et compétences nécessaires.
 - Coordination managériale. Elle a pour but de tenir les objectifs du projet de définition, notamment les échéances malgré les interactions entre activités et les éventuelles rétroactions sur les activités déjà effectuées. C'est le rôle du management de projet.
 - Coordination informationnelle. Elle a pour but d'assurer la cohérence des référentiels sur lesquelles travaillent les différentes équipes et gérer les modifications et leurs impacts. C'est l'aide apportée par la gestion de configuration.

Ainsi, ces processus techniques et leurs processus d'évaluation et justification sont managés et reçoivent l'aide de processus de support associés (management de l'information et de la communication, gestion de configuration, etc.).

La Figure 69 représente la vision de la boucle donnée par la norme IEEE 1220. Les processus principaux de la boucle d'ingénierie sont appelés :

- ❑ processus d'analyse des exigences (correspondant au processus de définition des exigences de la Figure 68),
- ❑ processus d'analyse fonctionnelle et allocation (correspondant à la conception logique ou fonctionnelle),
- ❑ processus de synthèse (correspondant à la conception physique).

Les processus de V & V sont inclus dans les processus de la boucle d'ingénierie (peut-être pour bien montrer qu'on vérifie et valide le résultat de chaque processus).

Le processus d'évaluation et comparaison d'alternatives, appelé **analyse système** dans la norme, reste factorisé dans cette représentation (peut-être pour montrer son caractère systémique).

Les processus de management et de support associé sont inclus dans le processus dit de maîtrise.

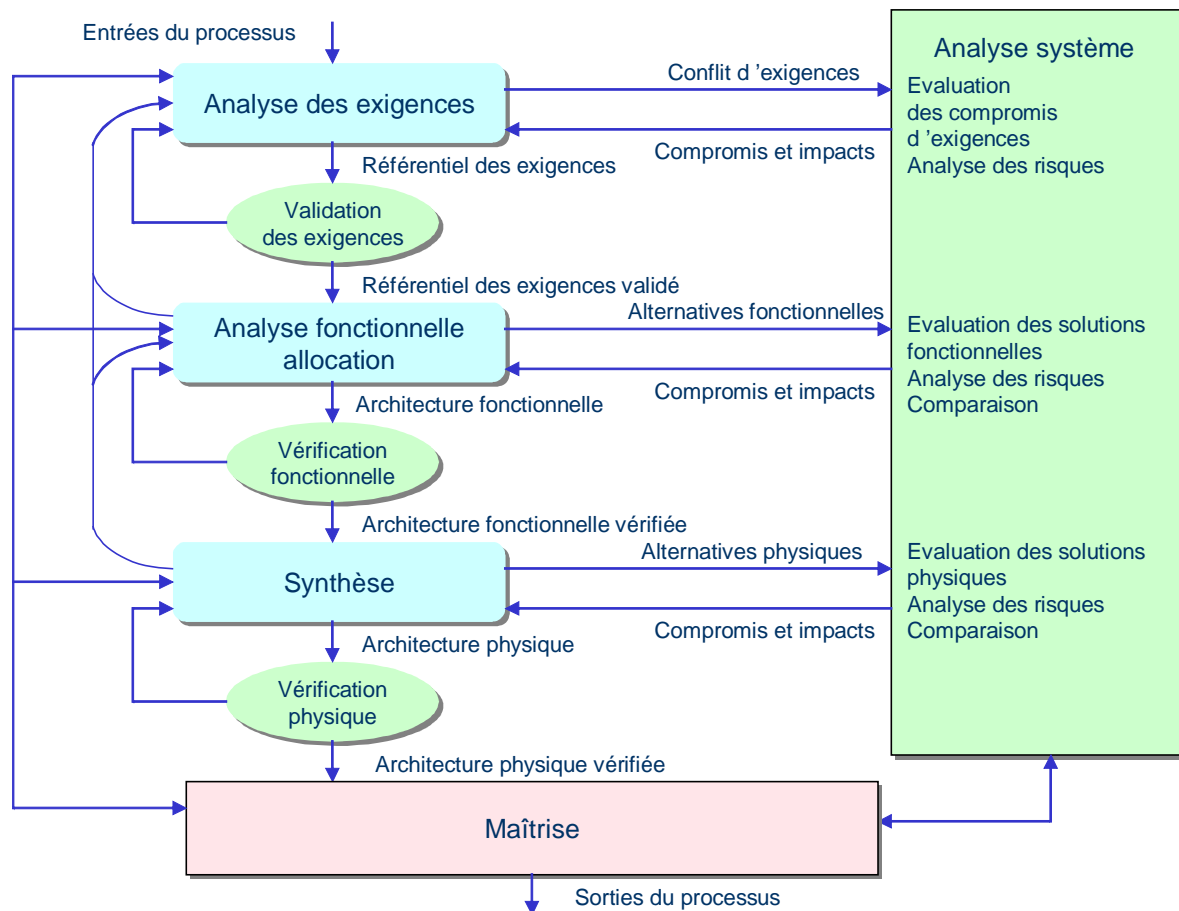


Figure 69 : La boucle d'ingénierie système selon IEEE 1220

12.3.1.1 Le processus de définition des exigences

Ce processus introduit sur la Figure 63 est détaillé en activités sur la Figure 70. Nous avons gardé la décomposition en sous-processus d'analyse des exigences des parties prenantes et sous-processus de spécification des exigences de la norme ISO 15288, mais l'énoncé (non exhaustif) des activités des sous-processus est plus particulièrement inspiré de la norme IEEE 1220, la plus détaillée sur les processus techniques.

Cette figure donne la vision processus associée à la description technique de la partie 2.

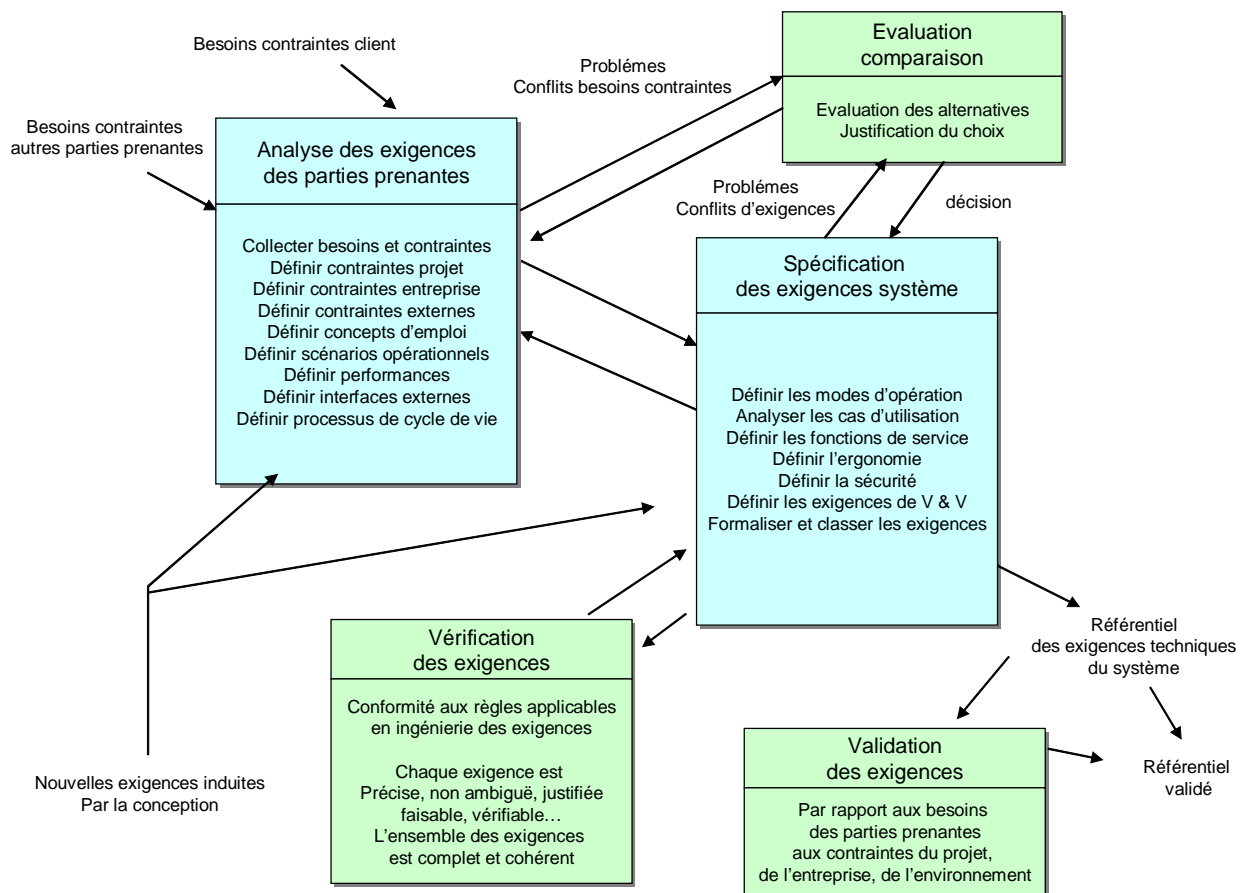


Figure 70 : Détail du processus de définition des exigences

12.3.1.1.1 Le processus d'analyse des exigences des parties prenantes.

Au premier cycle de la boucle d'ingénierie, c'est à dire au niveau du système global, il s'agit d'explorer le problème à résoudre dans tous ses aspects en analysant les besoins et contraintes des parties prenantes intéressées à l'utilisation et à l'exploitation du système, tout en anticipant sur les contraintes des autres parties prenantes susceptibles d'intervenir dans le cycle de vie du système et tout particulièrement dans sa conception.

Les principales activités consistent à faire exprimer et structurer les attentes des utilisateurs et exploitants, définir les contraintes du projet et de l'entreprise, ainsi que les contraintes externes (ambiance, sécurité, environnement, législation et règlement...), définir les scénarios opérationnels et les performances attendues, les limites du système, les interfaces externes, les concepts d'emploi et processus de cycle de vie, les environnements d'utilisation, etc. Voir Partie 2, chapitre 5.

Lors des autres cycles de la boucle, on reprendra cette analyse en la détaillant pour le constituant étudié, notamment en précisant les contraintes des parties prenantes concernées par le cycle de vie (développement, production, maintien, retrait de service) du constituant et en vérifiant leur compatibilité avec les exigences allouées par le niveau supérieur.

12.3.1.1.2 Le processus de spécification des exigences

Ce processus a pour objectif de traduire les exigences exprimant les besoins et contraintes des parties prenantes en un ensemble cohérent et complet d'exigences techniques non ambiguës, faisables et vérifiables

auxquelles la solution devra satisfaire pour rendre les services attendus dans le cadre des contraintes prescrites.

De multiples activités, dont les principales sont mentionnées sur la Figure 70, permettent de rédiger les exigences et de les classer et ainsi d'établir le référentiel des exigences techniques du système (ou de ses constituants lors des cycles suivants de la boucle). Voir partie 2, Chapitre 6 : ingénierie des exigences

12.3.1.1.3 Les processus d'évaluation et justification en définition des exigences

Les évaluations consistent à montrer que l'on converge vers un bon référentiel d'exigences, c'est à dire fait sans erreur selon les règles de l'art (rôle de la vérification), répondant au besoin (rôle de la validation), optimisé (rôle des évaluations/comparaisons des alternatives). Les résultats viennent abonder le dossier de justification de la définition du système.

Les exigences sont **vérifiées** tout au long de leur élaboration (bonne application du processus applicable traduisant l'état de l'art, vérification des caractéristiques de qualité des exigences prises individuellement et globalement, voir partie 2, 6.1.2) et *tout référentiel d'exigences est validé* par rapport aux besoins et contraintes des parties prenantes, du projet, de l'entreprise, de l'environnement qui lui sont applicables.

Les conflits d'exigences majeurs (besoins et/ou contraintes incompatibles) sont traités dans le cadre du processus **d'évaluation/comparaison** (analyse système) de manière à mettre en évidence, dans un contexte pluridisciplinaire, les conséquences et risques des différentes branches des alternatives et de prendre les décisions en toute connaissance de cause en justifiant les raisons des choix.

12.3.1.2 Le processus de conception

La conception est, tout au moins dans le cas des systèmes novateurs, faite à deux niveaux :

- ☐ au niveau logique (ou fonctionnel) on s'attache à définir une solution vue sous l'angle purement fonctionnel, évitant de faire trop vite les choix technologiques,
- ☐ au niveau physique, les organes réalisant les fonctions sont choisis ou définis.

Ce processus introduit sur la Figure 64 est détaillé sur la Figure 71, avec une liste (non exhaustive) des principales activités plus particulièrement inspirée de la norme IEEE 1220, la plus détaillée pour les processus techniques.

Cette figure donne la vision processus associée à la description technique de la partie 3, dans le chapitre 8 concernant la conception et l'architecture.

Toute conception implique une analyse ou une décomposition - se traduisant par une arborescence, de fonctions ou de constituants, auxquels les exigences sont allouées - et une construction se traduisant par une architecture (organisation des éléments terminaux d'une arborescence et explicitation de son fonctionnement). L'approche technique correspondant à ces processus est décrite en partie 3. chapitre 7 : le système réalisé est le résultat d'une conception.

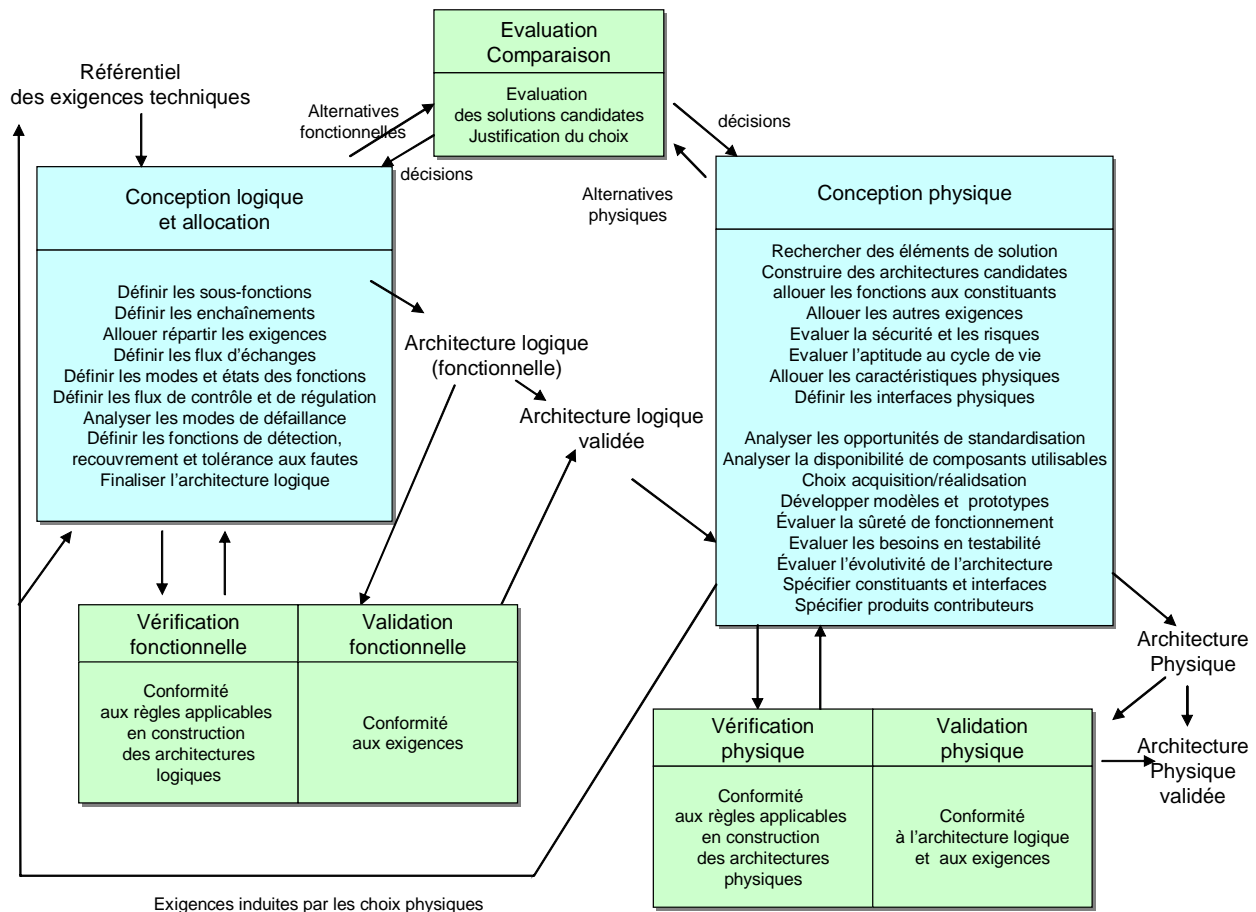


Figure 71 : Détail du processus de conception de la solution

12.3.1.2.1 Le processus de conception logique

Ce processus consiste à définir une architecture logique apte à répondre aux exigences fonctionnelles, en principe indépendante des choix technologiques. Elle combine deux approches fortement imbriquées :

- ❑ une approche analytique. Elle correspond, pour l'essentiel, à l'analyse fonctionnelle interne qui décompose les fonctions de service du système en sous-fonctions, avec allocation (répartition) des exigences fonctionnelles aux sous-fonctions. Elle s'accompagne d'analyses diverses : analyse comportementale (modes et états de fonctionnement dans les diverses conditions d'emploi), analyses des modes de défaillances fonctionnelles et de leurs effets...
- ❑ une approche constructive ; Elle correspond à la conception de l'architecture logique qui réaménage (factorisation, regroupement) les sous-fonctions, avec définition des flux transformés par les fonctions et des flux de contrôle, déclencheurs ou régulateurs des fonctions, ces derniers provenant des analyses comportementales. Elle inclut la définition de sous-fonctions techniques nécessaires, dont les fonctions de sûreté de fonctionnement associées aux risques de défaillances fonctionnelles.

Les principales activités de ce processus correspondent à la vision technique décrite en partie 3, chapitre 8.1 et 8.2.1 sont mentionnées sur la Figure 71. Elles débouchent sur l'architecture logique formée de modules fonctionnels en interaction auxquels sont allouées des exigences conforme au référentiel des exigences.

12.3.1.2.2 Le processus de conception physique

Ce processus consiste à réaliser une architecture d'organes (constituants) aptes à réaliser les fonctions de l'architecture logique tout en étant conformes au référentiel des exigences. Le processus met l'accent sur la recherche d'une solution optimisée en analysant les différents éléments de solution possibles, en construisant des solutions candidates et en les comparant.

Les principales activités de ce processus (correspondant à la vision technique présentée en partie 3, chapitre 8.2.2 et 8.2.3) sont mentionnées sur la Figure 71 en mettant en évidence des activités de conception architecturale (transformation de l'architecture fonctionnelle en architecture d'organes), des activités de choix technologiques et physiques, des activités d'évaluation et in fine des activités de spécification.

Le processus de conception débouche sur la spécification des constituants à développer ou acquérir, sur le plan définissant la manière de les intégrer, sur la spécification de tous les produits contributeurs à leurs cycles de vie (intégration, tests et essais, mise en service, exploitation, soutien logistique et maintenance, retrait de service), ainsi que sur la spécification de toutes les interfaces associées.

12.3.1.3 Les processus d'évaluation et de justification de la conception

Les évaluations consistent à montrer que l'on converge vers une bonne conception des architectures, c'est-à-dire faite sans erreur (rôle de la vérification), répondant au besoin (rôle de la validation) et optimisée (rôle des évaluations/comparaisons des alternatives). Les résultats de ces évaluations viennent abonder le dossier de justification de la définition du système.

Aux différentes étapes du processus, celui-ci est **vérifié** pour s'assurer qu'il est fait en conformité aux règles applicables, qui traduisent l'état de l'art et les savoir-faire en conception d'architecture. L'architecture fonctionnelle est **validée** par rapport au référentiel des exigences, l'architecture physique par rapport à l'architecture fonctionnelle et au référentiel des exigences.

Les alternatives majeures de conception fonctionnelles ou physiques font l'objet **d'évaluation-comparaison** (analyse système) afin de s'assurer que les choix sont faits après analyse pluridisciplinaire de leurs conséquences sur le système, son environnement, son cycle de vie, le projet, l'entreprise et en tenant compte des risques qu'ils entraînent et des parades correspondantes à prévoir. Voir le chapitre 12.3.2.

12.3.2 Compléments sur les processus génériques d'évaluation et justification

Ce chapitre a pour objectif de donner une présentation détaillée des processus d'évaluation et de justification introduits au chapitre 12.2.1 en tant que supports des processus de définition du système et d'IVV.

Comme nous l'avons décrit, chaque processus ou activité de la boucle d'ingénierie implique des évaluations :

- ☐ s'assurer que l'activité est bien faite en identifiant les écarts sur le résultat (vérification), qu'il correspond aux objectifs pour lesquels l'activité a été faite (validation),
- ☐ s'assurer que les problèmes majeurs rencontrés (tels qu'exigences contradictoires, alternatives de décomposition ou d'architecture) ont fait l'objet d'une recherche de compromis et d'optimisation de la solution (évaluation de solutions candidates au regard de leurs impacts et de leurs risques, comparaison multicritère, justification des choix) dans le cadre d'une approche pluridisciplinaire mettant en jeu les parties prenantes concernées.

Les résultats de ces activités justifient de la bonne définition du système (techniquement bien faite, répondant aux besoins et optimisée). Ils sont consignés dans le dossier de justification de la définition qui trace le passage des besoins/contraintes des différentes parties prenantes aux exigences en tenant compte des raisons de choix techniques et à leur obtention sur le système.

Suivant les normes, ces activités d'évaluation et de justification sont :

- soit incluses dans les activités des processus techniques (par exemple : validation d'un référentiel d'exigences inclus dans le processus de définition des exigences, comparaison de solutions architecturales alternatives inclus dans le processus de conception architecturale). Cette présentation a

l'avantage de montrer que ces processus d'évaluation font partie intégrante du processus technique et donc du rôle de l'ingénieur système qui le réalise,

*- soit factorisées dans des **processus de vérification et validation** et **processus d'évaluation-comparaison** qui apparaissent comme support de l'ensemble des processus. Cette présentation a l'intérêt de montrer que la justification de la définition du système est une préoccupation qui concerne l'ensemble des processus techniques et de leurs activités.*

Nous avons esquissé les rôles de ces processus en les appliquant spécifiquement aux deux processus principaux de la boucle d'ingénierie. Nous nous proposons ici de présenter ces processus sous forme générique : les processus de vérification & validation s'appliquent à toutes les activités, ceux d'évaluation/comparaison s'appliquent à tout choix.

12.3.2.1 Les activités génériques de vérification et validation

12.3.2.1.1 Les concepts de Vérification & Validation

Toute correction d'erreur dans la définition d'un système est d'autant plus coûteuse qu'elle intervient tard dans le cycle de développement. Il est donc judicieux de s'assurer, tout au long du développement que toute activité technique a été bien faite et répond à ses objectifs (voir Figure 72).

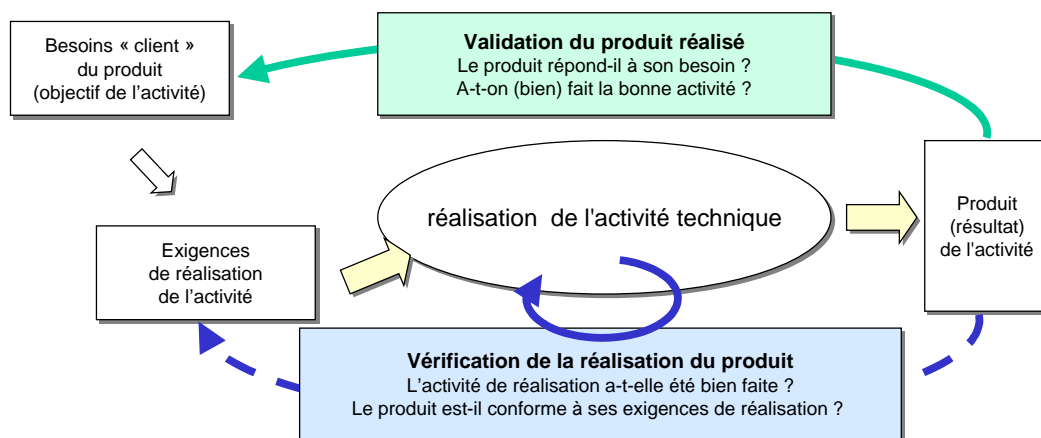


Figure 72 : Activités génériques de vérification et de validation

Les activités de **vérification** ont pour but de montrer que l'activité technique a été bien faite (sans introduire d'erreur), conformément à ses exigences de réalisation, dont les règles applicables traduisant notamment l'état de l'art, en mettant en évidence tout écart entre le produit de l'activité et ses spécifications. Elles peuvent se faire au cours de l'activité, par exemple sur les états intermédiaires successifs du produit de l'activité, en vérifiant sa conformité à ses exigences de réalisation appelées exigences spécifiées (ISO 9000), ou caractéristiques exigées (ISO 15288). L'ensemble des vérifications des activités techniques d'IS assure que l'on progresse vers la **définition d'un système bien fait**.

Les activités de **validation** ont pour but de montrer que l'activité technique répond à son objectif, que le produit résultant de l'activité répond au besoin pour lequel l'activité a été faite (ainsi définit-on progressivement le bon système). Elles se font en vérifiant la conformité du produit de l'activité aux besoins du « client » du produit de l'activité (conformité aux exigences que ce client a allouées au produit). L'ensemble des validations donne confiance en ce que l'on progresse vers la **définition d'un système répondant à son besoin**.

Ces activités de V & V comportent des revues (relectures croisées et vérifications de cohérences entre référentiels successifs ou entre référentiels des constituants d'un même niveau de décomposition du système), des tests et essais sur maquettes (de validation d'exigences, par exemple, maquettes ergonomiques), ou sur prototypes (par exemple prototype de faisabilité), des simulations, des preuves formelles...

On note sur la Figure 72 que la traduction du besoin du client de l'activité en exigences de réalisation du produit qui en résultera est elle-même une activité, donc justiciable de vérification et validation : il s'agit d'éviter de réaliser et de vérifier une activité à partir d'un référentiel de réalisation qui serait mal construit et/ou non conforme au besoin pour lequel l'activité est réalisée !

12.3.2.1.2 Le processus générique de Vérification & Validation

La Figure 73 fournit un schéma générique de tout processus de V & V, qui se décompose en :

- ❑ Un processus d'initialisation qui définit la stratégie de V & V à appliquer et en planifie les activités.
- ❑ Un processus de réalisation d'une activité de V & V (revue par les pairs, simulation, test, essai, preuve formelle...).
- ❑ Un processus de clôture justifiant la décision finale au vu des résultats de l'ensemble des activités de V & V.

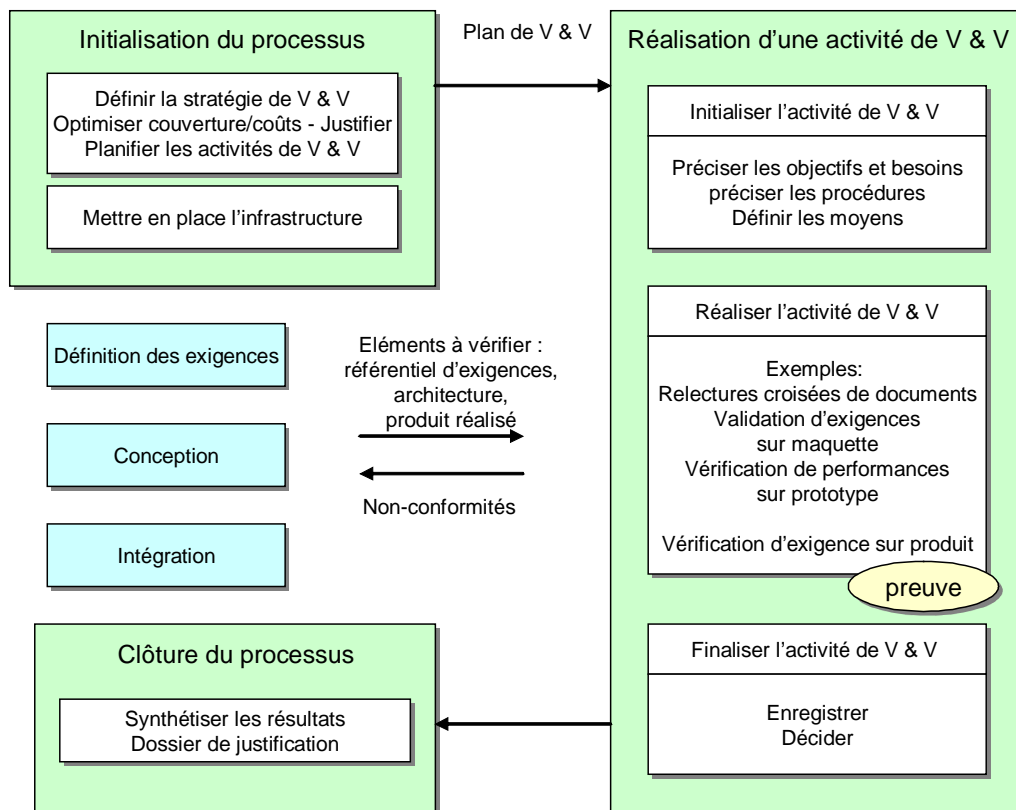


Figure 73 : Schéma générique d'un processus de V & V

Pour ce qui concerne les processus de définition, les Figure 70 et Figure 71 mettent en évidence le rôle des processus de V & V appliqués respectivement aux référentiels d'exigences et aux architectures.

Pour ce qui concerne le processus d'intégration, la Figure 74 met en évidence les référentiels d'exigences utilisés pour les opérations finales de V & V d'un produit du système ainsi que pour les tests ou essais au cours de son intégration. Notons que ces opérations s'appliquent aux constituants de différents niveaux et in fine au système lui-même. Elles s'appliquent également aux produits contributeurs.

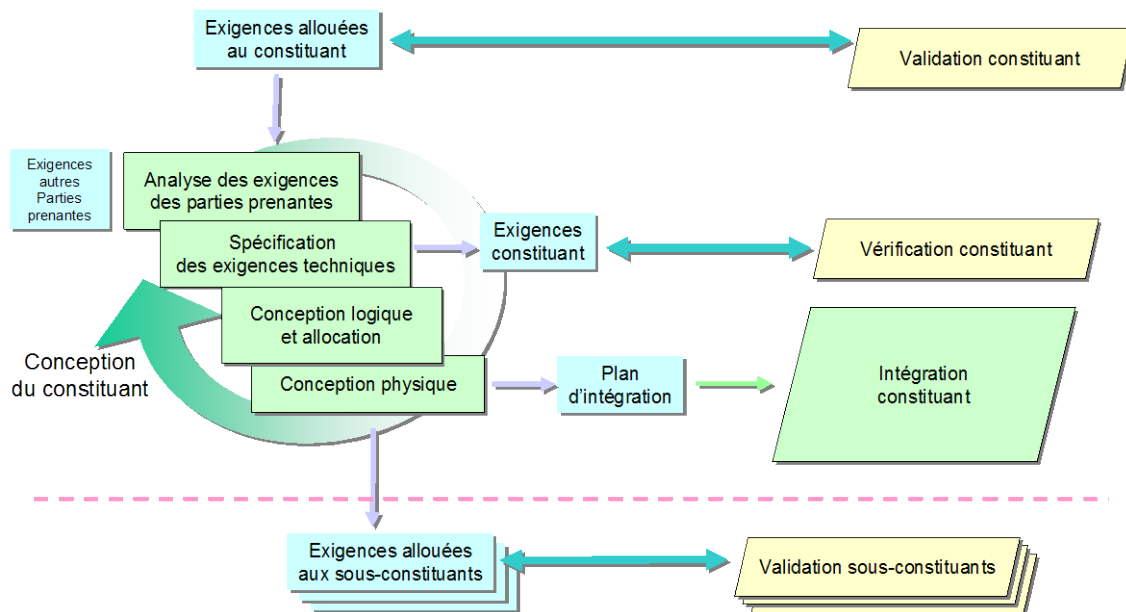


Figure 74 : V & V d'un constituant lors de l'intégration

Néanmoins, si ces référentiels sont bien à la base de toute planification du processus de V et V au cours de l'intégration, le principe de V & V systématique de toutes les exigences présente des limites (voir partie 3, 9.2.2 : encart sur la stratégie de V & V en vue de la qualification de la définition)

- ❑ Il n'est pas réaliste. On ne peut économiquement vérifier toutes les exigences à tous les niveaux de composition : par exemple la réalisation des simulateurs d'ambiances (thermiques, mécanique, électromagnétique, etc) pour tester en variations d'ambiance chaque composant ou constituant du système, serait de coût prohibitif pour des résultats peu significatifs. Certaines exigences de constituants ne peuvent être testées, pour être réaliste, que sur des constituants de niveau supérieur, voire que sur le système.
- ❑ Il n'apporte pas, pour autant, toutes les garanties. La vérification individuelle de toute exigences sur les constituants et in fine sur le système n'apporte pas de garantie concernant la conformité du système face à toutes les coïncidences ou successions d'événements de l'environnement dans toutes les hypothèses de cumuls de sollicitations d'ambiance, chocs, vibrations, chocs thermiques...

D'où l'importance de la phase amont de définition de la stratégie de V & V, qui vise à l'optimisation des justifications théoriques et des essais en vue d'apporter les preuves suffisantes (notion de couverture de la V & V) dans les limites de coût acceptable. Elle se traduit dans les plans de V & V, par exemple dans le plan justificatif de la définition d'un produit industriel.

12.3.2.2 Le processus générique d'évaluation-comparaison (ou d'analyse système)

Les processus de V & V ont pour but de garantir que l'on converge respectivement vers un bon système (au sens où il est bien fait) et vers le bon système (au sens où il répond aux besoins), reste à savoir si on converge vers le meilleur système répondant à l'ensemble de ces conditions ? C'est le rôle du **processus d'évaluation-comparaison**, encore appelé **processus d'analyse système**.

12.3.2.2.1 Les concepts d'optimisation en analyse système

L'IS apparaît comme une approche de résolution de problème sous contrainte des exigences des parties prenantes. On ne dispose pas de méthode presse-bouton pour définir la solution optimale respectant ce faisceau de contraintes (voir Figure 26) : il faudrait savoir les inclure dans une fonction économique unique dont on chercherait le minimum. De plus, les définitions précises de ces contraintes, à savoir celles des exigences

système finalement retenues, font partie intégrante du problème. C'est une des caractéristiques de complexité de l'IS, qui fait qu'on ne peut raisonnablement pas dire qu'il existe une solution optimale. On peut, tout au plus, espérer avoir les arguments comparatifs pour choisir rationnellement entre plusieurs solutions, évaluées et comparées selon des critères aussi objectifs que possible.

Il n'est, à l'évidence, pas pensable de développer toutes les solutions possibles et de ne choisir la meilleure qu'à la fin. L'IS implique donc de faire des choix tout au long du développement. Le but du processus d'évaluation-comparaison est alors que ces choix successifs convergent, sinon vers le meilleur système que l'on ne saurait définir, du moins vers un système optimisé. Pour cela, il prescrit que les choix résultent d'une analyse pluridisciplinaire apte à estimer les impacts majeurs de leurs alternatives sur le système, le projet, l'entreprise, l'environnement pendant la vie du système, ainsi que les risques et leurs parades. Ce processus est souvent appelé **analyse système** pour rappeler l'aspect systémique de cette analyse des impacts.

Notons que ce processus, qui consiste à justifier des choix successifs en estimant les impacts positifs (satisfaction, gains, efficacité) et négatifs (coûts, inconvénients et risques généralement traduisibles en coûts) s'apparente à l'**analyse de la valeur** dont il utilise les méthodes.

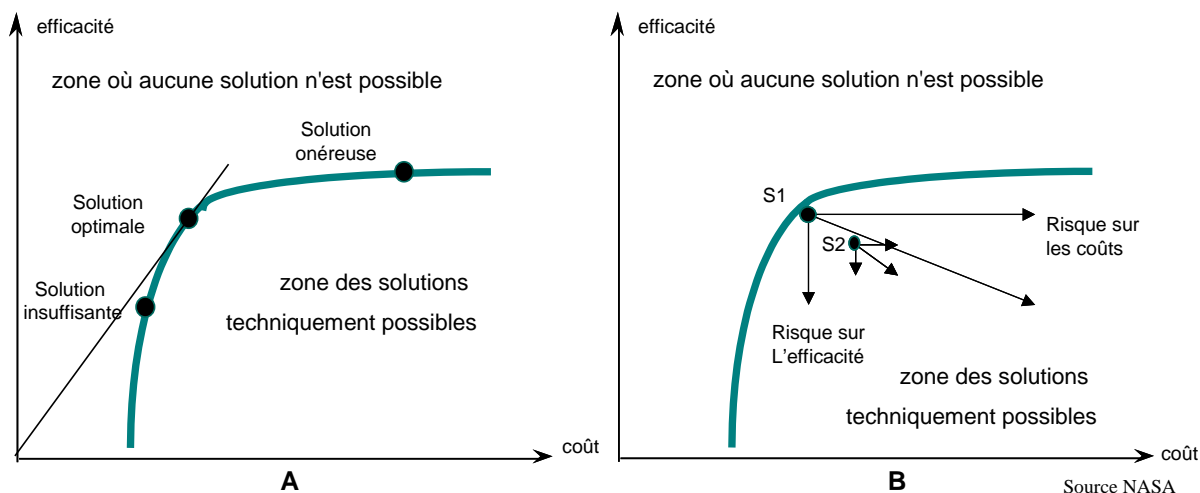


Figure 75 : Recherche d'optimisation de la solution (source NASA SE Handbook)

La Figure 75 présente le principe de cette recherche d'optimisation où le rapport impacts positifs sur impacts négatifs a été concrétisé en termes d'efficacité sur coût.

Idéalement (Figure 75A), on a globalement intérêt à se rapprocher de la courbe (théorique) qui présente le meilleur rapport efficacité sur coût possible et y rechercher le meilleur compromis entre l'« insuffisant » et le « superflu ».

Néanmoins (Figure 75B), il faut tenir compte des risques : toute diminution de coût, à efficacité constante, augmente les risques et toute augmentation d'efficacité, à coût constant, augmente les risques. Le compromis conduisant à S2 est probablement préférable à celui conduisant à S1.

Dans les phases amont d'analyse et spécification des besoins, on juge de l'opportunité de telle fonction ou de telle performance. Les critères de choix sont alors de type **utilité sur impacts négatifs ou gains sur coûts**, idéalement chiffrés par le retour sur investissement attendu de la fonction ou de la performance en question. C'est souvent à ce niveau que sont mis en évidence les plus importants gisements d'économie : comprendre et valider les réels besoins, justifier les contraintes, cerner les niveaux d'exigences strictement nécessaires, etc, ceci tout en anticipant les évolutions et impacts potentiels.

Dans les phases de conception, les solutions alternatives sont comparées globalement en termes d'**efficacité sur coût** en se focalisant sur les éléments les plus discriminants pour les comparaisons. Les modèles d'estimation de l'efficacité, des coûts et de prise en compte des risques associés dans les comparaisons sont traités au chapitre 13.4.

12.3.2.2.2 Le processus d'évaluation-comparaison

Le processus d'évaluation-comparaison est mis en œuvre chaque fois qu'un problème de choix est rencontré : conflit d'exigences, souvent de type besoin/contrainte, alternatives de concepts de solution : alternatives de décomposition, alternative d'architecture, alternative faire ou acquérir, etc.

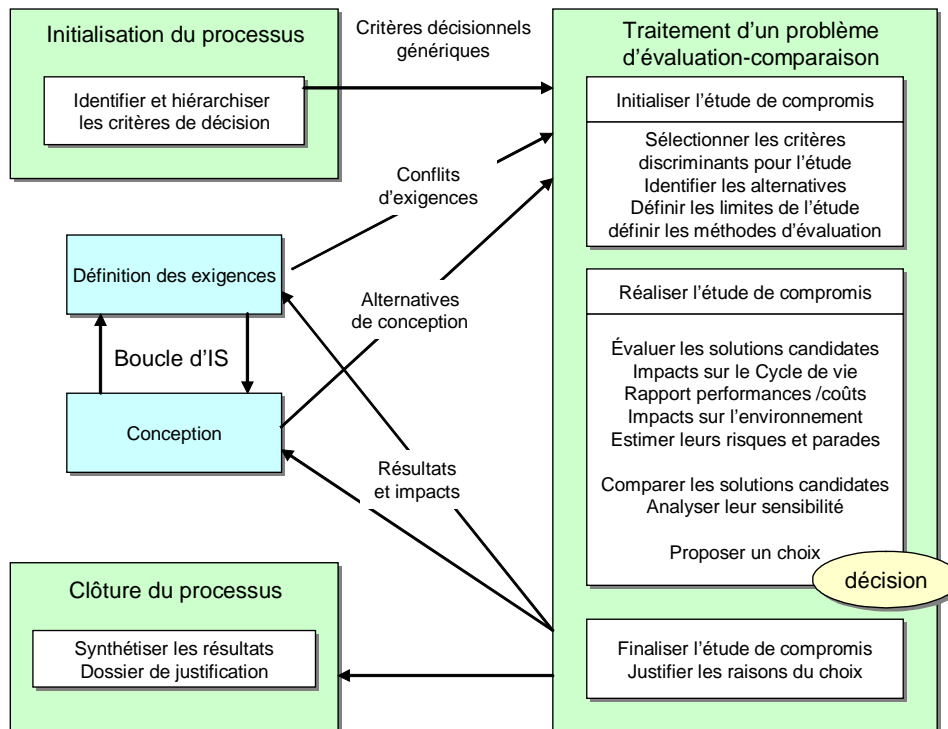


Figure 76 : Détail du processus générique d'évaluation-comparaison,

Le processus global comporte (Figure 76)

- ❑ Un sous-processus d'initialisation du processus qui, à partir des finalités du système et du projet, identifie, formalise et hiérarchise les grandes classes de besoins et contraintes, fournissant ainsi les critères majeurs de choix : dans quel ordre place-t-on les critères de sécurité, de coût de production, de coût de cycle de vie, d'esthétique, d'ergonomie, de délais... Ceci fournit un modèle décisionnel générique à usage des choix successifs.
- ❑ Un sous-processus de traitement des problèmes rencontrés dans les activités d'ingénierie et justifiant une analyse multidisciplinaire. Il est quelquefois nommé **étude de compromis**. Il est instancié en cas de conflit d'exigences et d'alternatives de conception fonctionnelle ou physique le justifiant.

Il comporte des activités d'initialisation de l'étude, notamment sa limitation au juste nécessaire (l'analyse système doit elle-même s'optimiser), des activités d'évaluation et estimations (efficacité, coûts, impacts et risques) ainsi que de comparaison multicritère des solutions candidates, des activités de préconisation de choix et enfin des activités de traçabilité des raisons du choix, une fois la décision prise par les acteurs concernés. Notons l'intérêt de l'enregistrement des résultats d'études de compromis, incluant les avantages, inconvénients et risques des solutions rejetées, au cas où la solution retenue s'avérerait par la suite inappropriée.

- ❑ Un sous-processus de clôture du processus, au cours duquel les résultats obtenus sont synthétisés et enregistrés dans le dossier de justification des choix.

13 LES METHODES DE L'IS

13.1 Introduction aux méthodes de l'IS

13.1.1 Rôle des méthodes et outils méthodologiques

Les **processus**, au moins dans leurs aspects générique et normatif, ne définissent que les activités à faire (le quoi faire ?), mais pas la manière de les faire (le comment faire ?).

C'est là qu'interviennent les **méthodes**. Tout en se référant à des invariants tels que les bonnes pratiques issues de l'expérience ou les formalismes issus de la théorie (notamment des théories sur les systèmes dans les méthodes de conception), les méthodes peuvent être dépendantes des secteurs d'activité ainsi que des types de système, de projet ou d'organisation.

Pour être effectivement appliquées, les méthodes doivent être outillées (le : avec quoi faire ?).

La multiplication des types d'activité et des méthodes entraîne la multiplication des **outils** qui par ailleurs sont utilisés par de multiples acteurs et disciplines. Il faut donc une infrastructure d'intégration des outils, permettant la mise en commun des données d'ingénierie et le travail coopératif.

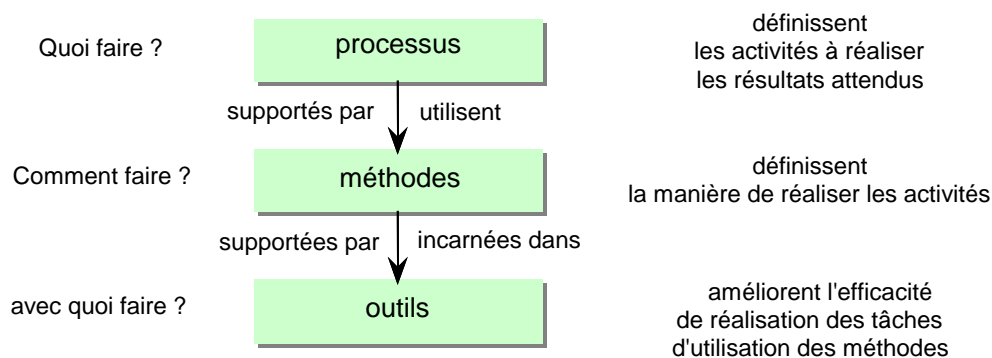


Figure 77 : Rôles respectifs des processus, méthodes et outils

Remarque : les termes méthodes et outils peuvent prêter à confusion. On distingue :

- les méthodes couvrant le cycle de conception d'un système, souvent appelées « méthodologies » (peut être à tort vis-à-vis de la langue française, le terme renvoyant plutôt à l'étude des méthodes),
- les méthodes élémentaires qui les constituent (par exemple méthode d'analyse comportementale),
- les outils méthodologiques que ces dernières utilisent (par exemple FFBD, diagramme d'états, réseau de Petri, Grafcet... pour l'analyse comportementale),
- et enfin les outils, en particulier informatiques, qui les implémentent.

Un ensemble d'outils informatisés intégrés en vue de supporter une ou des méthodologies d'IS constitue un atelier d'IS.

Les **méthodes d'ingénierie système** présentent deux aspects :

- ❑ **Un aspect démarche** qui explicite la logique de réalisation des activités des processus. Des méthodes élémentaires et des outils peuvent aider ces activités. Exemple : méthode outillée de gestion des exigences, de gestion de configuration...
- ❑ **Un aspect modélisation et simulation** avec des méthodes élémentaires et des outils permettant de modéliser ou simuler tout ou partie du problème, de l'environnement, de la solution. Leur objet est d'aider à comprendre le problème, prescrire et construire la solution, en prédire ou en vérifier des fonctionnalités,

des comportements ou des performances. Exemples : méthodes et outils de modélisation et simulation comportementale.

Ainsi les méthodes d'IS complètent l'IS dirigée par les processus en concrétisant ces derniers par des pratiques méthodologiques pour en réaliser les activités, et en y adjoignant une approche d'IS dirigée par les modèles (Model Based Systems Engineering).

Comprendre pour bien utiliser les méthodes et outils

Les outils ne sont bien utilisés, tout particulièrement dans le domaine de la conception, que si les fondements des méthodes qu'ils supportent ont été préalablement assimilés en profondeur. La compréhension de l'approche système, objet des chapitres précédents, et la capacité d'abstraction correspondante contribuent à la maîtrise des outils pour résoudre le problème, plutôt que de se laisser guider par lui : « quand on a un marteau dans les mains, tous les problèmes prennent une tête de clou ».

13.1.2 Besoins en modélisation et typologie des modèles

Nous n'appréhendons la complexité du réel qu'à travers les modèles que nous nous en faisons. Modéliser est ainsi une nécessité pour comprendre ou présenter un système. Les concepteurs, réalisateurs, exploitants élaborent ou utilisent des modèles du système. On n'a, en effet, aucune chance de comprendre ce qu'on ne peut modéliser, et en conséquence aucune possibilité de concevoir et d'utiliser avec rigueur.

Spécifier, concevoir et développer un système, c'est en élaborer des modèles de plus en plus précis jusqu'à l'obtention du système réalisé.

Éléments sur les concepts de modélisation

Rappelons qu'un modèle est une représentation d'un objet réalisée en vue d'en étudier certaines propriétés.

Cette représentation peut être :

- ☐ concrète : par exemple, un modèle réduit de profil pour étude en soufflerie,
- ☐ abstraite : par exemple, un système d'équation représentant l'écoulement des fluides autour du profil.
- ☐ Mixte ou hybride : par exemple pour simuler un système lorsque certaines parties sont physiquement réalisées.

Il possède donc en principe les propriétés du système modélisé que l'on veut étudier, il ne possède pas toutes les propriétés de ce système (sinon ce serait le système lui même) et il possède des propriétés qui lui sont propres (ne serait-ce que celles de son support physique ou logique).

Rappelons que la modélisation est à la base de la démarche scientifique : *constatations* dans le champ empirique (existant à étudier), *abstraction* pour passer dans le champ théorique avec des critères de simplicité et d'élégance, *formalisation* du modèle avec des critères de logique et de cohérence, *validation* du modèle par comparaison entre les prévisions faites sur le modèle et l'expérimentation dans le champ empirique, et définition du domaine de validité du modèle. En ingénierie système, ce cycle est adapté aux besoins de modélisation (modéliser un système existant et en déduire un modèle du nouveau système qui le remplacera, faire un modèle prédictif de comportement du système face à des évolutions des paramètres de l'environnement et définir le domaine de validité de ce modèle, etc...).

Les modèles abstraits peuvent être plus ou moins formels. Au cours de la conception d'un système on passe généralement de modélisations semi-formelles d'aide à l'analyse et aux choix de conception, à des modèles plus formels permettant de faire des simulations, d'automatiser la réalisation, voire d'établir des preuves de conformité de comportement.

Tout modèle abstrait est supporté par un langage (graphique, textuel, mathématique) de modélisation. Nous nous intéresserons ici plus à la pragmatique des langages de modélisation (leur efficacité dans le contexte du problème à résoudre) et à leur sémantique (ce qu'il peut représenter du système dans le monde réel) qu'aux

aspects syntaxiques et lexicaux, néanmoins importants pour la facilité d'apprentissage et d'utilisation.

Du fait de sa complexité, un système doit être modélisé suivant différents points de vue. On appelle système de modélisation un ensemble cohérent et coordonné de types de modèles pour représenter un certain type de systèmes. Sans entrer dans le détail de tels systèmes, nous donnons des exemples de grilles (ou cadres) de modélisation structurants pour acquérir une bonne « approche système ».

La modélisation est ainsi une base fondamentale pour répondre à de nombreux besoins de l'ingénierie système.

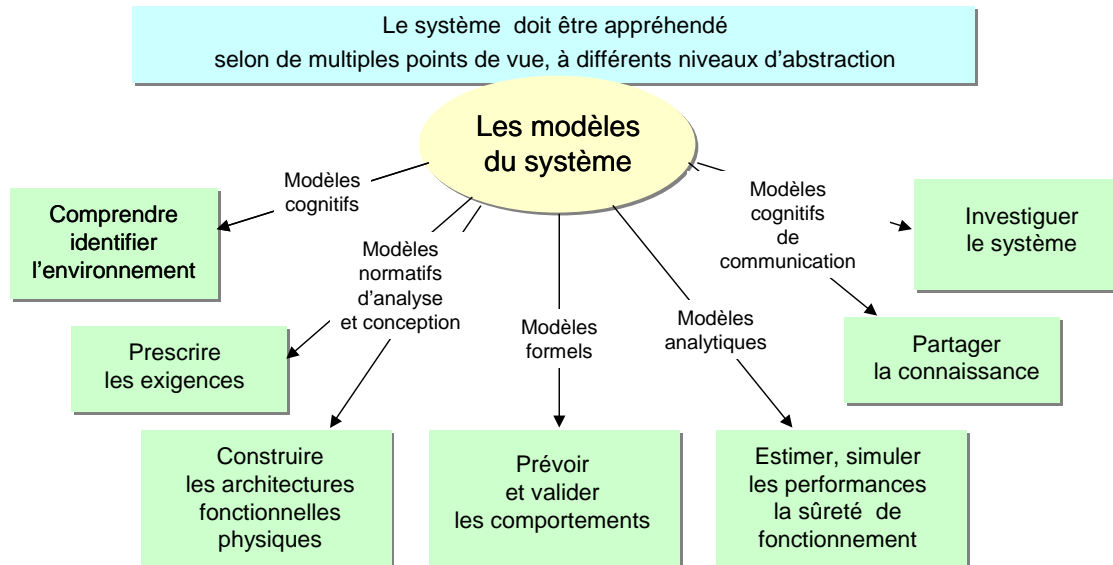


Figure 78 : Pourquoi modéliser en IS : quelques exemples

La Figure 78 illustre les exemples d'utilisation de modèles en IS suivants :

- ☐ Modéliser pour comprendre, pour formaliser la connaissance : c'est notamment le cas de la modélisation de l'environnement qu'il faut appréhender au mieux et, lorsque c'est possible et opportun, identifier formellement au moyen d'un modèle analytique (par exemple : calculs d'orbitographie en spatial, identification d'un processus chimique à piloter...).
- ☐ Modéliser pour prescrire : modèles d'exigences (prescrivant ce à quoi doit satisfaire le système), mais aussi modèles pour simuler des besoins ou valider des exigences (exemple : maquettes d'expérimentation et de validation d'interfaces utilisateur).
- ☐ Modéliser pour construire : modélisation des architectures (développée au paragraphe 13.3.2.)
- ☐ Modéliser pour simuler, pour prédire : simulation et prédiction de comportement du système (par exemple ; modèles événementiels, analytiques, probabilistes), simulateurs d'entraînement.
- ☐ Modéliser pour pouvoir vérifier, pour prouver (exemple : spécifications formelles et preuves de comportement).
- ☐ Modéliser pour partager et investiguer : les modèles sont une base d'échange pour le travail coopératif. Ils permettent l'appréhension du système par les différentes disciplines : par exemple en recherche des dysfonctionnement potentiels tant par le spécialiste de sûreté de fonctionnement que par les chefs de quart en formation ou en exploitation.

- ❑ Enfin, *last but not least*, modéliser pour réutiliser : Les modèles conceptuels des systèmes sont souvent beaucoup plus stables que les réalisations technologiques que nous en faisons et sont donc susceptibles de réutilisation. L'approche actuelle du MDA (*Model Driven Architecture*) dans le domaine des systèmes d'information, où l'on « programme » directement des modèles, leur « implémentation » sur les différentes plates-formes étant automatisée, en est un exemple.

Plus formellement, en modélisant tout système comme une boîte noire transformant des entrées en sorties sous le contrôle d'un pilotage, le tableau de la Figure 79 présente une approche structurante de la typologie des modèles utilisés en IS.

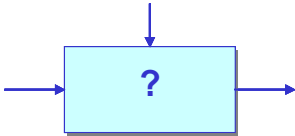
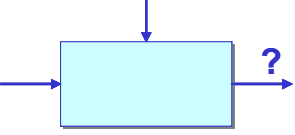
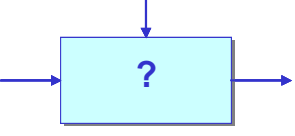
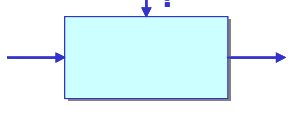
TYPE DE MODELE	EXEMPLES D'APPLICATIONS EN INGENIERIE SYSTEME
<p>Modèle cognitif</p> 	<p>On cherche à comprendre ou connaître un système existant</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modèles systémiques descriptifs ou explicatifs du système existant ou de l'environnement • Modèles analytiques d'identification d'un procédé à piloter, obtenu par expérimentation sur le procédé • Modèle de comportement cognitif ou sensori-moteur de l'utilisateur (pour l'ergonomie des interfaces homme-machine)
<p>Modèle prévisionnel</p> 	<p>On cherche à prévoir les sorties ou simuler des comportements non encore observés d'un système</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modèles formels de comportement dynamique en fonction d'événements d'entrée (systèmes temps réel) • Modèles analytiques de prévision de performances • Modèle de fiabilité, fournissant des probabilités de défaillance au cours du temps
<p>Modèle normatif</p> 	<p>On cherche à définir un système à réaliser</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modèles prescriptifs : spécification des propriétés exigées ou souhaitables • Modèles constructifs : modèles d'architecture ou de conception d'un système
<p>Modèle décisionnel</p> 	<p>On cherche à définir le pilotage d'un système</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modèles d'optimisation ou pilotage d'un processus fournissant les valeurs optimales ou acceptables de commande • Modèles de décision permettant d'éclairer des choix, par exemple en conception ou exploitation de système

Figure 79 : Typologie de modèles

Commentaires :

- ✓ La modélisation s'applique aussi bien au système à faire qu'au système pour faire. Dans le chapitre 12 de cette partie consacré aux processus, la plupart des figures apparaissent comme des modèles des processus de l'IS.
- ✓ Bien que l'ingénierie système, ses spécialités et les métiers utilisent toute la panoplie des types de modèles, nous nous focaliserons essentiellement, dans ce document, sur la modélisation dite systémique (voir paragraphe 13.3) qui fournit les représentations successives du système au cours de sa conception, et s'apparentent pour l'essentiel à de la **modélisation d'architectures** : représentations structurelles et temporelles des éléments du système et celles du système et de son environnement et de leurs relations/interactions (constituants logiques ou physiques, flux

physiques et flux informationnels de données ou de contrôle), Ceci implique de multiples points de vue de modélisation répertoriés dans des grilles d'analyse des systèmes.

13.1.3 Besoin d'intégration des outils et partage des données

La multiplicité actuelle des types d'outils et la complexité des organisations impliquent que les outils informatisés puissent être intégrés dans des ateliers d'ingénierie système et qu'ils puissent interopérer. Outre les aspects techniques de cohabitation des outils dans les ordinateurs et de communication en réseau, la base de cette intégration est d'ordre sémantique : les outils doivent interpréter de la même manière les structures de données d'ingénierie.

D'où la nécessité de modèles de données sous jacents définissant et reliant les entités manipulées au cours des travaux d'ingénierie.

La Figure 80 en donne un exemple concernant les entités qui sont au cœur de l'IS (relativement au système à faire), inspiré des modèles de données d'ateliers système existants. On notera sa valeur d'aide à la compréhension des relations entre les concepts manipulés par l'IS.

Remarque : La figure peut se compléter vers la gestion de projet : les constituants doivent être conçus, réalisés, intégrés, vérifiés et validés, ce qui génère des tâches, base pour entrer dans les concepts projet : lots de tâche, responsabilités, planning... ou encore vers la gestion de configuration : les constituants sont susceptibles d'être des éléments de configuration, et donc vers la documentation...

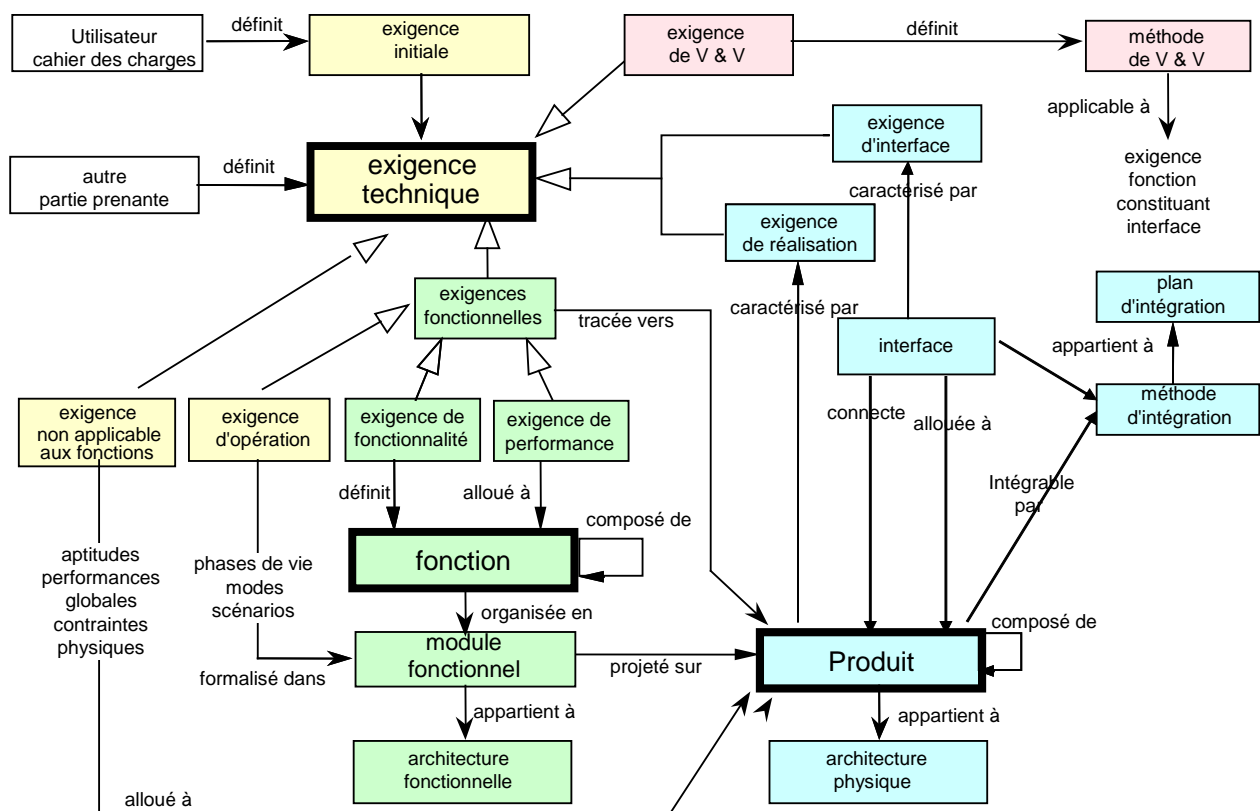


Figure 80 : Exemple de modèle sémantique du cœur de l'IS

Afin de disposer d'une base conceptuelle consolidée pour les échanges entre industriels, ainsi qu'avec les organismes de standardisation ou de normalisation et les éditeurs d'outils informatisés, l'AFIS a entrepris de définir les fondamentaux auxquels doit satisfaire ce type de modèle.

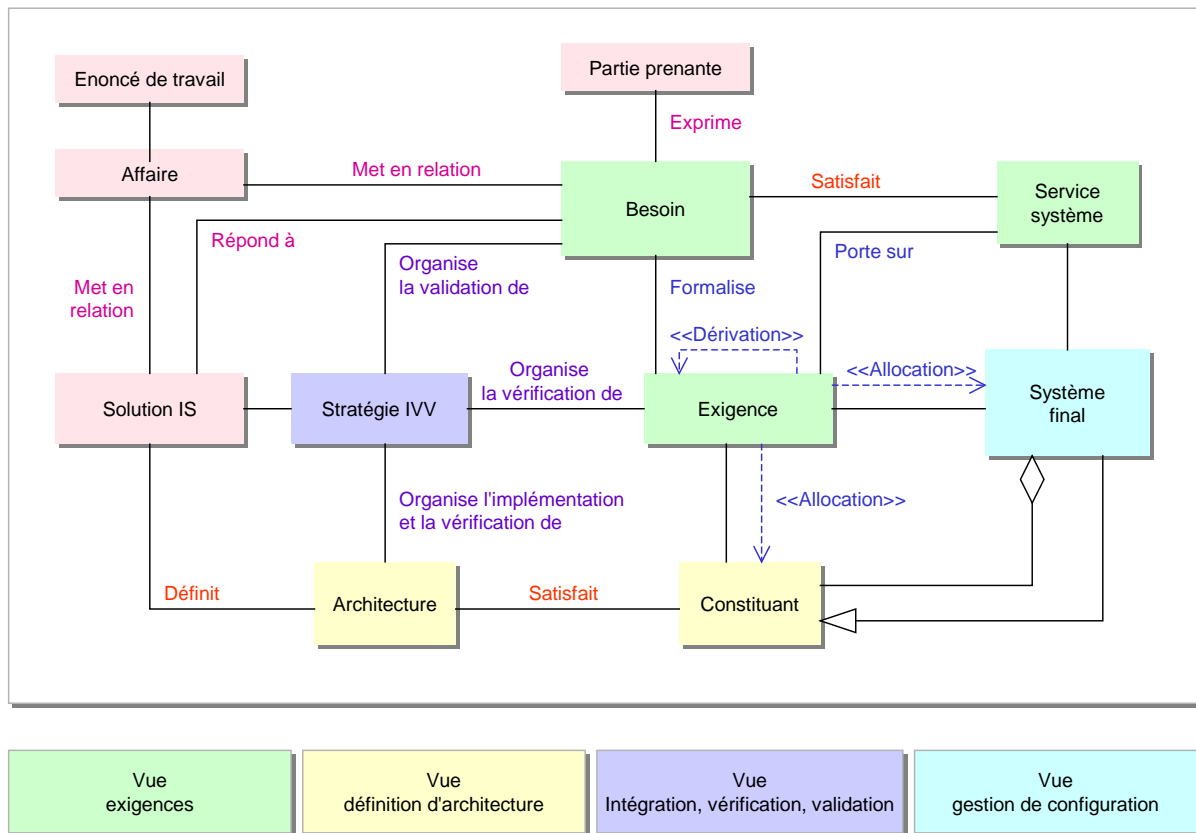


Figure 81 : Vue synthétique du modèle de données AFIS

Dans l'état actuel du projet, une version de l'aspect ingénierie avec les vues **exigence**, **architecture**, **IVV** (intégration, vérification, validation) et **gestion de configuration** est disponible à titre expérimental (voir Figure 81). Le périmètre du modèle doit être étendu aux autres aspects de l'IS, notamment de management et de relations d'affaire.

13.1.4 Typologie des méthodes et outils de l'IS

La Figure 82 tente un classement des principaux types d'outils méthodologiques utiles en IS.

Il n'est pas possible de présenter l'ensemble des méthodes et outils méthodologiques dans le contexte de ce document. Nous nous proposons de nous limiter, dans les 4 chapitres suivants, à une introduction succincte :

- aux outils méthodologiques de support de deux processus clé de l'IS : l'ingénierie des exigences et la gestion de configuration,
- aux approches de modélisation systémique,
- aux approches d'évaluation du rapport efficacité sur coût, en vue de comparaison des solutions,
- et à titre d'exemple, aux méthodes d'une spécialité : la sûreté de fonctionnement.

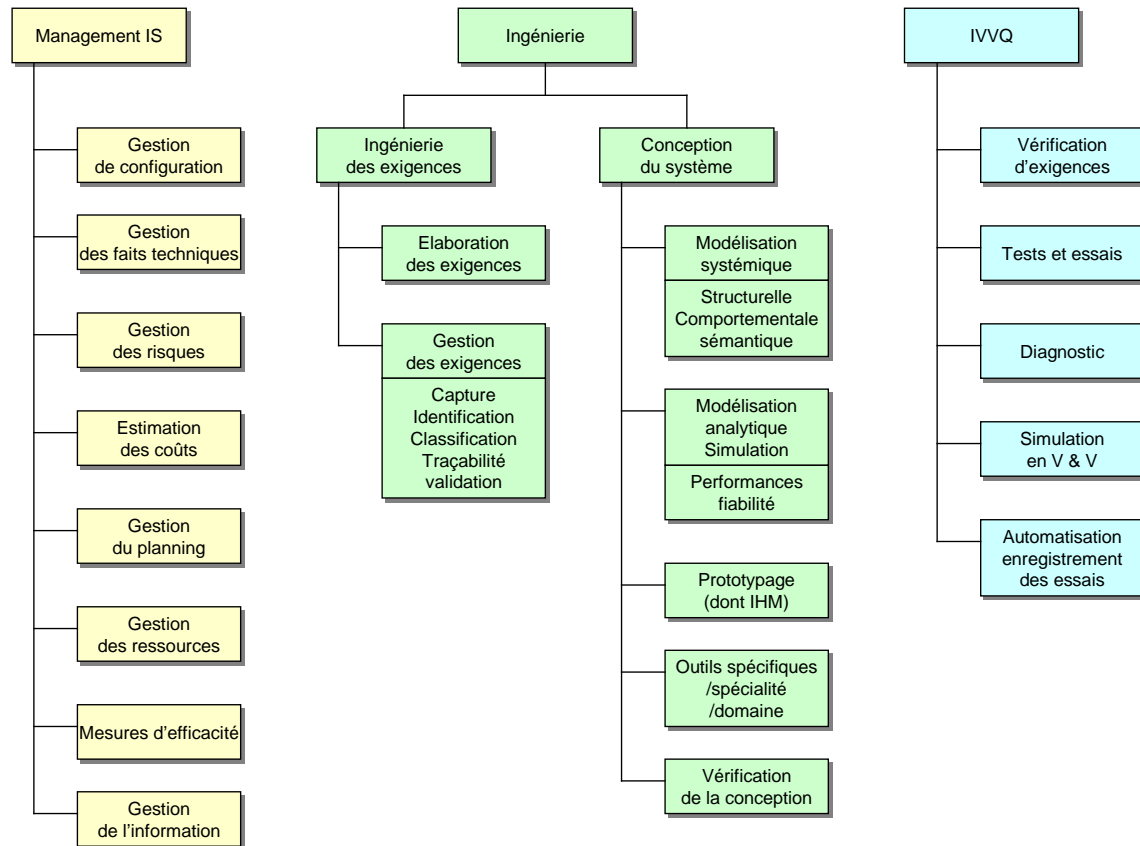


Figure 82 : Parmi les méthodes et outils de l'IS

13.2 Les outils de base de l'IS

Lorsque l'on commence à déployer l'ingénierie système, les premiers outils informatisés généralement mis en place concernent les activités des processus d'ingénierie des exigences et de gestion de configuration. De tels outils s'appuient sur les invariants de ces processus, et sont généralement susceptibles, par paramétrage, d'un certain niveau d'adaptation aux choix méthodologiques de l'entreprise.

13.2.1 L'ingénierie des exigences

Rappelons que l'ingénierie des exigences, décrite dans la partie 2, regroupe le processus de définition (identification et dérivation) des exigences ainsi que le processus de gestion des exigences (traçabilité, modifications...). Voici les principales fonctions d'un tel outil :

- ☐ Assister l'ingénieur à la saisie, la dérivation ou l'allocation des exigences, à la saisie des liens d'association de chaque exigence avec sa source ou son exigence amont (traçabilité amont), avec sa justification, notamment si elle résulte d'un compromis ou si elle a nécessité une étude de faisabilité, avec les hypothèses associées à son applicabilité, avec les méthodes de vérification ... ainsi qu'avec les liens de traçabilité aval (exigences dérivées ou allouées à des sous-fonctions ou constituants). Voir Figure 32.
- ☐ Gérer les référentiels d'exigences et leurs modifications. Fournir les impacts de toute modification d'exigence (grâce aux liens de traçabilité amont et aval). Conserver l'historique des modifications.
- ☐ Suivre la maturité des exigences : suivre, à partir des matrices de traçabilité et des matrices de vérification, l'évolution de l'allocation et de la vérification des exigences et en déduire des indicateurs d'avancement du

projet : pourcentage d'exigences initiales transformées en exigences système, pourcentage d'exigences système allouées aux sous-systèmes, pourcentages d'exigence sous-système allouées aux constituants, etc ; pourcentages d'exigences vérifiées sur les constituants, sur les sous-systèmes, sur le système, etc.

13.2.2 La gestion de configuration

La configuration est définie comme l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles et physiques d'un système ou produit telles qu'elles sont définies dans la documentation et qu'elles sont atteintes dans la réalisation.

13.2.2.1 Du besoin au concept de gestion de configuration

Pour répondre à la problématique d'évolution des besoins et d'élaboration progressive des configurations au cours du processus d'ingénierie ainsi que de répartition du travail entre de multiples acteurs, il est nécessaire de préciser la version de configuration à partir de laquelle les différentes équipes peuvent travailler, et de maintenir à jour la configuration en garantissant la cohérence et en gérant les impacts de toutes ses modifications. C'est le rôle de la **gestion de configuration**. Un document est géré en tant que documentation dès qu'il doit être diffusé pour servir de référence à d'autres que ses auteurs. Il est géré au titre de la configuration dès qu'il est associé à la définition d'un des objets du système. Toute évolution ultérieure de ce document doit faire l'objet d'un processus de gestion de l'évolution : tous les impacts sont analysés préalablement à l'autorisation de mise en application ; l'application d'une évolution nécessite, après validation documentaire et/ou technique, l'approbation formelle de l'autorité de configuration (Notons que les évolutions d'un document en création doivent être également gérées sous la responsabilité de leurs auteurs).

La gestion de configuration est appliquée aux **articles de configuration**, qui sont des agrégations de matériel, de logiciel ou mixtes, que l'on a désignés pour être traitées de manière unitaire dans le processus de gestion de configuration.

Au fil des phases du processus d'ingénierie appliqué de manière itérative sur les différents niveaux de l'arborescence système, on distingue, pour chaque article de configuration, plusieurs références de configuration (ou configurations de référence), par exemple :

- ☐ une **référence fonctionnelle ou référence de conception** constituée des documents de spécifications approuvées (référentiel d'exigences complété par l'arborescence des articles de configuration et les liens entre articles de configuration et exigences) régissant son développement,
- ☐ une **référence de réalisation** constituée de la documentation de définition approuvée régissant sa réalisation,
- ☐ une **référence de production** constituée de son dossier de fabrication approuvé.

L'approbation d'une référence de configuration est la référence pour les activités ultérieures. Cette approbation intervient lors de la mise en place de l'activité de maîtrise de la configuration puis généralement aux changements de phases du processus d'ingénierie système. Les évolutions approuvées pendant la phase sont prises en compte dans la **configuration approuvée courante** (configuration de référence de la phase complétée dès évolutions approuvées). Il arrive que la configuration approuvée courante devienne la nouvelle configuration de référence. Ainsi par exemple, la configuration approuvée courante existant à la fin d'un développement devient logiquement la configuration de référence de la phase d'industrialisation, au cours de laquelle s'ajouteront les compléments de données propres à la production qui n'auraient pas été définies au cours du développement : compléments concernant l'arborescence de production, les gammes de fabrication, le plan de contrôle et de tests, les procédés imposés, etc.

La gestion de configuration doit se poursuivre pendant la vie opérationnelle du système. On distingue alors :

- ☐ La **configuration approuvée courante** du système (sa configuration de référence complétée des évolutions approuvées)
- ☐ La **configuration applicable** à un exemplaire (configuration approuvée courante où est précisé pour chaque exemplaire la décision de lui appliquer ou non chacune des évolutions).

- ☐ La **configuration appliquée** d'un exemplaire (configuration approuvée courante où est précisée pour chaque exemplaire l'application ou la non application de chaque évolution).

La configuration applicable à un exemplaire est sa référence de conformité. La comparaison de la configuration applicable et la configuration appliquée d'un exemplaire permet la détection de tout écart de conformité

Au cours de la vie du système certaines modifications de la configuration approuvée courante doivent être répercutées sur les exemplaires déjà en service, souvent sous forme de mise à niveau regroupant les modifications jugées nécessaires. Dans ce cas la configuration applicable à ces exemplaires est mise à jour, ce qui permet de maîtriser les évolutions à appliquer sur ces exemplaires.

Ainsi, la gestion de la configuration garantit la cohérence de la définition du système, la conformité des exemplaires et la maîtrise de leurs évolutions tout au long du cycle de vie du système.

La gestion de la configuration met en jeu un processus précis qui doit être outillé afin de garantir une bonne maîtrise de la configuration. Compte tenu de la diversité, de la quantité et de la répartition des données de configuration entre une multitude d'acteurs, le processus de configuration et le plan de gestion de configuration d'un projet sont indissociables du processus de gestion de l'information et des outils de gestion et diffusion associés.

13.2.2.2 La planification de la gestion de configuration

Elle comporte les activités suivantes :

- ☐ Identification des besoins en gestion de configuration.
- ☐ Organisation de la gestion de configuration :
 - définition des procédures d'identification, d'enregistrement et de maîtrise de la configuration de manière à ce qu'elle prenne en compte de façon élémentaire chaque article de configuration sur l'ensemble de son cycle de vie, et de façon globale l'ensemble des articles pour garantir la cohérence système (prise en compte, par exemple, des versions de configuration des articles et de leur compatibilité),
 - définition de l'organisation pour qu'elle soit faite à la fois *par* et *pour* tous les intervenants concernés,
 - constitution des autorités de décision et de contrôle donnant les autorisations formelles de mise en configuration avec leur niveau de responsabilité sur les éléments du projet,
 - définition de l'architecture logique de la base de données de configuration qui répertorie les référentiels de configuration et les dossiers ou documents associés,
 - définition et mobilisation des moyens humains et techniques à mettre en œuvre.
- ☐ Formalisation du plan de gestion de configuration répertoriant les principes d'organisation et les règles de gestion ainsi définies. Il planifie et organise notamment les quatre domaines d'activité de la maîtrise de configuration :
 - l'identification des configurations,
 - l'enregistrement des configurations,
 - la maîtrise des évolutions,
 - la conduite des audits de configuration.

13.2.2.3 L'identification des configurations

Cette activité comprend :

- ☐ La désignation des entités à gérer en configuration (articles de configuration), leur place dans la structure de données, la formalisation de leur identificateur.
 - Ce sont les entités que l'on estime nécessaire de gérer en configuration en les considérant comme un tout. Ce peut être tant des constituants du système (matériels ou logiciels) que des produits contributeurs (modèle comportemental utilisé pour la justification, maquette ou muet utilisés pour le

développement, banc d'essai et sa bibliothèque de programmes pour de la testabilité en production...).

- Les articles de configuration satisfont aux trois exigences suivantes :
 - identification : un article de configuration possède son propre référentiel qui permet d'en identifier les réalisations au travers du marquage d'identification donnant la référence de chaque exemplaire réalisé,
 - individualisation : un article de configuration est sérialisé, par lot ou unitairement, afin d'assurer la traçabilité des informations nominatives de configuration propres à chaque exemplaire réalisé,
 - interchangeabilité : un article de configuration fait l'objet systématiquement d'une spécification technique de besoin et d'interfaces permettant de déterminer les conditions d'interchangeabilité ou de non-interchangeabilité lors d'une évolution.
 - Le choix des articles de configuration se fait en général selon les critères ci-dessous :
 - visibilité nécessairement partagée entre le maître d'œuvre industriel et l'utilisateur (maître d'ouvrage, opérationnel, maintenancier),
 - contribution forte à la performance globale du système,
 - criticité liée à l'existence de facteurs de risques élevés (élément critique du système, technologie émergente, processus industriel de fabrication pointu,.....),
 - connaissance sans équivoque de sa constitution,
 - besoin de gérer certaines caractéristiques individuelles pour chaque exemplaire : N° de version, numéro de pièce dans la série, potentiel, date de visite périodique, performance évolutive,.....
- ☐ La définition de la documentation associée à chaque article de configuration.
 - ☐ La définition des référentiels de configuration par exemple : référentiels d'exigences, dossier de définition, dossier de justification, nomenclature de configuration à produire, dossier de conformité et écarts de configuration, nomenclature de configuration de maintenance.

13.2.2.4 L'enregistrement des informations de configuration

L'enregistrement des configurations consiste à enregistrer les données relatives aux entités gérées en configuration après approbation de l'autorité de configuration compétente, ceci comprenant :

- ☐ l'enregistrement des éléments après approbation pour la construction du référentiel de configuration en cours,
- ☐ l'enregistrement des modifications après approbation, non sans avoir vérifié la cohérence globale des référentiels après modification.
- ☐ L'enregistrement des données concernant les exemplaires, par exemple, composition, application des évolutions sur l'exemplaires, etc).
- ☐ La production des « rapports de configuration » prévus par le plan de gestion de la configuration.

13.2.2.5 La maîtrise des évolutions

La configuration subit des évolutions tant en phase de conception et développement qu'après mise en service : évolution du besoin ou de l'environnement, évolution technologique (obsolescence de composants, opportunité d'amélioration), découverte d'anomalie ou d'impossibilités techniques. La maîtrise des évolutions comprend :

- ☐ la description de l'origine de l'évolution : besoin nouveau, anomalie détectée, etc,
- ☐ la formulation d'une demande d'évolution avec les éléments de justification,
- ☐ l'étude de l'évolution concrétisée par une solution définie de modifications, sa justification garantissant la cohérence par l'étude d'impacts globale sur l'ensemble des articles de configuration (produits du système et produits contributeurs) et des éléments du projet,

- ☐ après accord de l'autorité de décision, et dans les conditions contractuelles notifiées, la réalisation de la modification, dont sa validation, suivie de la mise en configuration de la nouvelle version après approbation,
- ☐ en phase d'exploitation, la « mise en production » et le suivi de la nouvelle version (dont le report éventuel sur les exemplaires déjà en service).

On cherche à minimiser le coût des impacts des évolutions, sachant que celles-ci sont d'autant plus pénalisantes qu'elles interviennent à un stade plus avancé dans le cycle de vie (parce qu'elles entraînent plus de réfections en phase de conception ou développement ou qu'elles concernent un plus grand nombre d'exemplaires en phase d'exploitation). Cette recherche s'appuie sur :

- ☐ La hiérarchisation des évolutions en fonction de leur impact sur le système et sur le projet, le classement devant satisfaire l'ensemble des acteurs concernés. Par exemple, pour les évolutions de la configuration après mise en service, on peut distinguer les niveaux suivants :
 - Correction d'erreur (de documentation) : elle consiste à remettre à jour la documentation associée à un article de configuration (correction ou ajout d'information) sans modification de l'article, après s'être assuré que cette correction n'a aucun impact sur les éléments en configuration.
 - Amendement : évolution mineure d'un article de configuration apportant une amélioration (performance, fabricabilité, maintenabilité) ne mettant pas en cause son interchangeabilité avec la version initiale.
 - Modification : évolution obligatoire (nouveau besoin, anomalie critique) entraînant la non interchangeabilité des versions initiales et finales de l'article (ou des articles) de configuration concerné(s), vue de l'emploi et/ou de la maintenance. Elle peut entraîner des modifications d'éléments de l'environnement d'exploitation et de maintien en condition opérationnelle du système.
- ☐ En opérant des regroupements d'évolution :
 - Regroupement d'études d'évolution portant sur les mêmes éléments.
 - Regroupement de modifications de configuration à reporter sur des exemplaires en service, souvent réalisés lors d'une opération de maintenance programmée pour chacun des exemplaires concernés.

13.2.2.6 La vérification de la configuration

Les audits de configuration permettent en fin de développement de s'assurer qu'un exemplaire conforme à sa réalisation est conforme à ses spécifications :

- ☐ l'**audit de configuration fonctionnelle** vérifiant la conformité du produit réalisé à ses spécifications,
- ☐ L'**audit de configuration physique** vérifiant la conformité du produit réalisé à sa configuration applicable.

La configuration audité à la fin du développement (industrialisation comprise) devient en général la référence de configuration pour la phase de production.

En plus de ces deux types audits lié au système, des **audits du système de gestion de configuration** ont pour but de vérifier, tout au long de la vie du système, la bonne élaboration et la bonne mise en œuvre du plan de gestion de configuration ainsi que la qualité des procédures utilisées pour gérer la configuration.

13.3 Les approches de modélisation d'architecture

En notant que tout système peut être appréhendé comme un « ensemble d'éléments en interaction entre eux et avec l'environnement organisé pour répondre à une finalité », il s'agit ici de modéliser cette organisation d'éléments avec leurs interactions. Cette modélisation est dite « systémique », car elle ne se limite pas à la représentation structurelle de l'architecture du système (par exemple des boîtes représentant des composants logiques ou physiques reliés par des liens d'interfaces entre eux et avec les éléments de l'environnement). Elle doit également représenter le comportement du système, ce que font ses éléments et l'enchaînement de leurs interactions, avec les caractéristiques des flux échangés dont leur sémantique (signification) pour les flux informationnels.

Les types de modèles des systèmes se sont multipliés, au cours de l'élaboration de multiples méthodes d'IS, pour prendre en compte les différents points de vue que l'on peut avoir sur le système. Ils ont hérité des approches traditionnelles d'analyse fonctionnelle des systèmes, complétées par les approches d'analyse comportementale et de pilotage des automaticiens ainsi que par les approches d'analyse systémique, dont sémantique des informaticiens, ou encore par des approches de spécialité comme la sûreté de fonctionnement.

Les spécialistes de systèmes d'information et les informaticiens ont abouti à la définition d'un langage unifié de modélisation (UML, *Unified Modeling Language*) fondé sur le paradigme objet et applicable notamment aux systèmes d'information. UML ne traitant pas certains aspects des systèmes, par exemple des flux continus, un langage général de modélisation des systèmes (SysML, *System Modeling Language*) a été normalisé en 2006 (OMG, INCOSE). Il récapitule, dans un formalisme de type UML, la plupart des types de modèles utilisés jusqu'ici dans les différentes méthodes d'ingénierie système antérieures.

Il n'est pas question ici de rentrer dans les formalismes de modélisation, mais seulement de tenter une synthèse des approches de modélisation systémique appliquée aux systèmes du domaine de l'IS, apte à servir de socle pour les approches d'ingénierie système dirigée par les modèles (*Model Based Systems Engineering*)

Pour cela ce chapitre propose d'introduire à la modélisation systémique à travers :

- ☐ une revue des types de modèles intervenant en modélisation systémique, classés en modèles sémantiques (cf. chapitre 13.3.1.1), modèles structurels (cf. chapitre 13.3.1.2) et modèles comportementaux (cf. chapitre 13.3.1.3),
- ☐ une mise en œuvre de ces modèles pour la modélisation d'un système à différents niveaux d'abstraction (cf. chapitre 13.3.2) : vision opérationnelle (contextuelle), vision fonctionnelle, vision physique (avec compléments sur les systèmes d'information),
- ☐ une synthèse de ces modèles en les récapitulant dans une première grille de modélisation (cf. chapitre 13.3.3.1) et en montrant succinctement comment SysML (cf. chapitre 13.3.3.2) les complète pour répondre aux besoins des outils d'IS,
- ☐ une synthèse de ces approches de modélisation sous forme d'une grille générique de modélisation systémique (grille Sagace), présentée pour sa valeur pédagogique (cf. chapitre 13.3.3.3),
- ☐ enfin, une vision élargie à l'approche des systèmes socio-techniques, (cf. chapitre 13.3.3.4) également sous forme de grille (cadre de Zachmann).

13.3.1 Les modèles de base pour représenter les systèmes

On s'est originellement trouvé devant la nécessité de représenter les systèmes sous différents aspects, notamment structurels (Structure sémantique du problème à résoudre, structure fonctionnelle ou physique du système) et comportementaux (fonctionnement et évolution du système).

Ces représentations utilisent des diagrammes selon différents formalismes. La plupart entrent dans la catégorie des modèles semi-formels et ne peuvent alors se substituer à des descriptions textuelles dont ils en sont des illustrations. Nous listons ici les types de diagrammes les plus généraux utilisés dans les diverses méthodes d'IS, en indiquant éventuellement leur reprise ou leur prolongement dans SysML.

13.3.1.1 Les modèles sémantiques

Les modèles sémantiques sont généralement utilisés pour structurer un domaine de connaissance (à ce titre, on les associe souvent à des diagrammes de type structurels). Le modèle de base est le modèle entité-relation qui représentant les entités ou classes d'objets du domaine et leurs relations.

A titre d'exemple, la Figure 80 est un modèle sémantique du cœur du métier de l'IS. On y trouve les principaux objets de l'IS (exigences, fonctions, constituants, interfaces et la manière dont ils sont reliés). La Figure 109 est un modèle sémantique structurant du domaine du management de projet.

Ces modèles sémantiques, également appelés modèles conceptuels, sont utilisés en IS pour structurer le problème en établissant les relations entre les concepts du problème. Ils sont à la base de l'analyse des systèmes d'information. Ils sont alors appelés modèles conceptuels de données. Complétés alors par les attributs ou caractéristiques des entités et éventuellement des relations, ces modèles « entité-relation-attribut », définissent la sémantique des données et fournissent aux informaticiens les structures (les schémas) des bases de données associées.

13.3.1.2 Les modèles structurels

Ces modèles sont utilisés pour représenter les architectures dans une vision structurelle (statique). Ils montrent l'agencement des éléments d'un système avec leurs relations (supports des interactions).

- ❑ Dans la vision fonctionnelle ou logique, on utilise des **diagrammes de flux**. On part généralement d'un diagramme dit de **flux de données** (*data flow diagram*) ou de flux opérants : les boîtes représentent des fonctions (ou des modules fonctionnels) transformateurs de flux opérants (matière, énergie, information). Les liaisons représentent ces flux opérants transformés par les fonctions.

Voir l'exemple de la machine à laver Figure 43.

On note que les fonctions doivent être pilotées, c'est à dire déclenchées ou arrêtées en fonction d'événements et continûment régulées, et qu'elles peuvent elles-mêmes produire des événements ou des données de régulation. C'est le rôle des **flux de commande** (control flow) généralement rajoutés au diagramme de flux en fonction de l'analyse comportementale.

- ❑ Dans la vision organique ou physique, ils représentent généralement les constituants du système et leurs liens d'interface. Voir l'exemple simplifié de la machine à laver le linge Figure 44.

Ces types de diagrammes trouvent typiquement leurs prolongements logiques dans les **diagrammes de bloc** (*block diagram*) de SysML.

13.3.1.3 Les modèles comportementaux

Ces modèles fournissent des visions dynamiques du système (processus de fonctionnement ou scénarios d'évolution à différents niveaux d'invariance temporelle) et font donc intervenir plus ou moins explicitement le temps.

En fonction du niveau de complexité des problèmes (notamment d'asynchronisme) et du besoin (compréhension, simulation, preuve formelle de comportement), on utilisera plusieurs types de modèles représentant l'aspect discontinu de la dynamique ou du comportement des systèmes :

- ❑ Les modèles représentant les séquences d'échanges entre éléments. Utiles pour représenter les scénarios opérationnels entre système et éléments de l'environnement, ils ont été formalisés dans UML/SysML sous forme de **diagrammes de séquence** (*sequence diagram*) pour représenter les scénarios de sollicitations entre objets. La Figure 66 en donne un exemple simplifié avec la représentation des échanges de type contractuel entre maître d'ouvrage et maître d'œuvre.
- ❑ Les modèles représentant les enchaînements (ou flux) d'activités. Rappelons qu'une activité n'est autre que l'aspect dynamique d'une fonction : elle représente l'exécution de la fonction. De multiples formalismes ont été utilisés.

Citons notamment les **diagrammes de flux fonctionnels**, plus connus sous le sigle de FFBD (*functional flow block diagram*), un des plus anciens types de modèle utilisé en IS (Westinghouse, TRW fin des années 50). Ils représentent les enchaînements d'activité avec des possibilités d'alternatives, de parallélisme et d'itération. La Figure 43 représentant le fonctionnement de la machine à laver le linge en donne un exemple dans le formalisme moderne.

Ces diagrammes peuvent être complétés par la représentation des flux opérants entre activités et/ou des flux de contrôle, une activité déclenchant une autre activité ou se synchronisant avec elle. Les **diagrammes d'activité** (activity diagram) de SysML en sont plus ou moins le prolongement.

- ❑ Les modèles de type **état-transition** représentant les états du système et les transitions entre états. C'est le modèle comportemental de base des systèmes réactifs répondants aux sollicitations de l'environnement. En utilisation générale, les transitions sont générées par des événements externes ou internes, et déclenchent des actions : déclenchement ou arrêt d'activité, ou encore changement de loi de régulation d'activité. Ces diagrammes d'états issus de la théorie des automates à nombre d'états finis ont également fait l'objet de nombreux formalismes.

Citons notamment le formalisme des **statecharts de Harel** qui a introduit la représentation de la profondeur (super-états décomposés en sous-états) et du parallélisme (synchronisation entre diagrammes d'états de sous-systèmes). Ils ont été repris dans les **diagrammes d'état** (*state diagram*) de SysML.

Remarque : on utilise également d'autres types de modélisation comportementale discrète. Les réseaux de Petri, et leurs différentes variantes temporisées, stochastiques..., sont aptes à formaliser aussi bien les FFBD que les diagrammes d'états, et fournissent des formalismes puissants pour prouver des comportements (notamment utilisés en sûreté de fonctionnement). Citons également le Gafcet utilisé par les automaticiens. Les réseaux de files d'attente permettent de modéliser les systèmes de type client-service avec des lois de probabilité concernant tant l'arrivée des clients que les durées des services.

Notons que le domaine du continu relève de modèles analytiques, assez généralement des systèmes d'équations aux dérivées partielles avec une variable indépendante représentant le temps, tels que des modèles de mécanique des solides, des fluides, de transfert thermique, d'électronique, d'électromagnétisme, de détonique, etc. Les modèles analytiques peuvent être associés aux éléments feuilles de la décomposition fonctionnelle pour leur attribuer des lois d'évolution ou de régulation, afin de définir leur comportement continu et de permettre des simulations intégrant fonctionnement continu et discontinu.

De manière très générale les modélisations comportementales discrètes, continues ou mixtes sont à la base des simulations qui permettent de prédire voire de prouver des comportements et les performances associées, et par là même de mieux assurer les choix de conception et limiter et justifier les essais de validation.

13.3.2 Mise en œuvre de la modélisation systémique en conception

Ces différents types de modèles permettent d'appréhender les systèmes sous différents points de vue. Ceci conduit bien évidemment à un problème de cohérence et d'intégration entre modèles. C'est le rôle des outils méthodologiques de supporter la démarche de conception fondée sur la modélisation, en garantissant les relations et la cohérence entre modèles et en assurant la traçabilité des opérations de conception.

Nous proposons à la réflexion du lecteur une approche générale de conception orientée par les modèles inspirée par une compilation de différentes méthodes d'IS. Nous la synthétiserons au paragraphe 13.3.3.2 suivant, par une grille générique de modélisation indiquant des exemples de types de représentation utilisables selon les points de vue. Cette grille n'a rien de normatif (encore moins d'exhaustif) : elle n'a d'autre usage que de planter un décor structurant.

13.3.2.1 Vision opérationnelle

Dans la modélisation opérationnelle, le système est vu comme une boîte noire rendant les services attendus à son environnement (voir Figure 83).

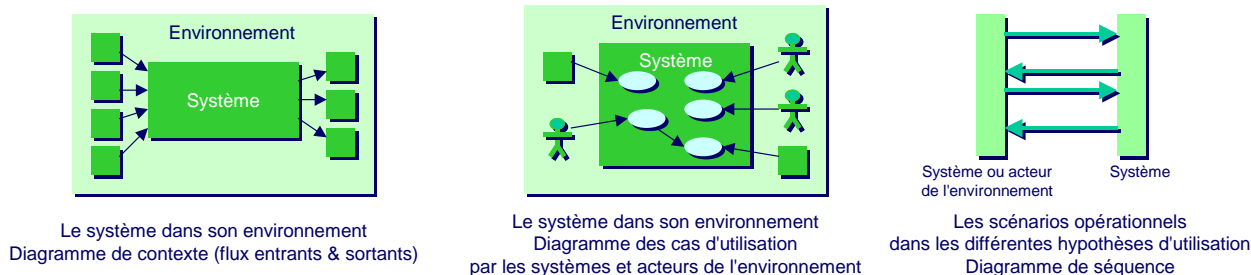


Figure 83 : Diagrammes types en vision opérationnelle

Sur le plan structurel, il s'agit de représenter la boîte noire système dans son contexte, c'est-à-dire en relation avec les éléments de son environnement. Ils peuvent avoir pour objectif :

- ☐ D'aider à explorer le problème : représentations informelles des relations système éléments de l'environnement en recherche des éléments susceptibles de bénéficier des services du système, de rendre des services au système ou d'avoir des impacts potentiels réciproques avec le système.
- ☐ D'aider à rechercher les fonctions de service du système. Les diagrammes de flux, généralement dits de contexte, montrent les éléments origine et destination des flux transformés par le système pour remplir sa mission. Ils sont notamment utiles pour représenter les aspects transformationnels, en particulier continus. Les diagrammes de cas d'utilisation s'intéressent aux sollicitations du système par des éléments extérieurs ou inversement des éléments extérieurs par le système. Ils sont notamment utiles pour représenter les aspects réactifs tel que service rendu à la demande.

Sur le plan comportemental, il s'agit de représenter les scénarios de comportements du système vis-à-vis des éléments de son environnement. Ils peuvent avoir pour objectif

- ☐ d'aider à envisager les scénarios d'utilisation opérationnelle du système en montrant les enchaînements de modes d'intervention attendus du système face aux évolutions de l'environnement,
- ☐ de façon plus formelle de représenter des séquences d'échanges entre le système et un (ou plusieurs) élément(s) de l'environnement par exemple pour un cas d'utilisation ou une fonction de service.

Notons que ces diagrammes, tout en restant au niveau relations système environnement peuvent se décliner à plusieurs niveaux : global système, pour une mission du système, une sous-mission, un cas d'utilisation, une fonction de service. Ils accompagnent l'exploration initiale du besoin opérationnel, l'analyse fonctionnelle externe, la définition des exigences initiales et exigences système.

13.3.2.2 Vision fonctionnelle (ou logique) interne

Nous avons vu que la conception fonctionnelle (logique) implique une décomposition structurée (analyse fonctionnelle interne) et une recombinaison des fonctions obtenues pour obtenir l'architecture (voir partie 2, Chapitre 7, notamment les figures concernant l'exemple de la machine à laver le linge).

Les approches traditionnelles d'analyse fonctionnelle, qui conduisent à l'arborescence des fonctions, utilisent des modélisations sous forme de diagrammes de flux montrant les boîtes fonctionnelles reliées par les flux (matière, énergie, information) qu'elles échangent. A titre d'exemple, les actigrammes de la méthode SADT (*Structured Analysis and Design Technique*) représentant à chaque niveau de décomposition les boîtes fonctionnelles ainsi que les flux dits de données transformés par les fonctions (horizontalement) et les flux de contrôle nécessaires à l'exécution de ces fonctions (verticalement). La Figure 84 en donne une illustration possible sur le cas de la machine à laver le linge.

Cette modélisation qui combine des aspects structurels et comportementaux dans un seul type de modèle est bien adaptée à la recherche des fonctions et sous-fonctions, donc à la décomposition fonctionnelle, mais reste inadaptée pour représenter les architectures logiques :

- D'abord sur le plan structurel, car elle ne conduit pas directement à la structure de l'architecture qui nécessite un réagencement des fonctions feuilles de l'arborescence (prise en compte de factorisations de fonctions, par exemple).
- Ensuite sur le plan comportemental, car elle est insuffisante pour modéliser précisément l'aspect temporel et donc permettre de simuler des comportements (événements déclencheurs des fonctions par exemple).

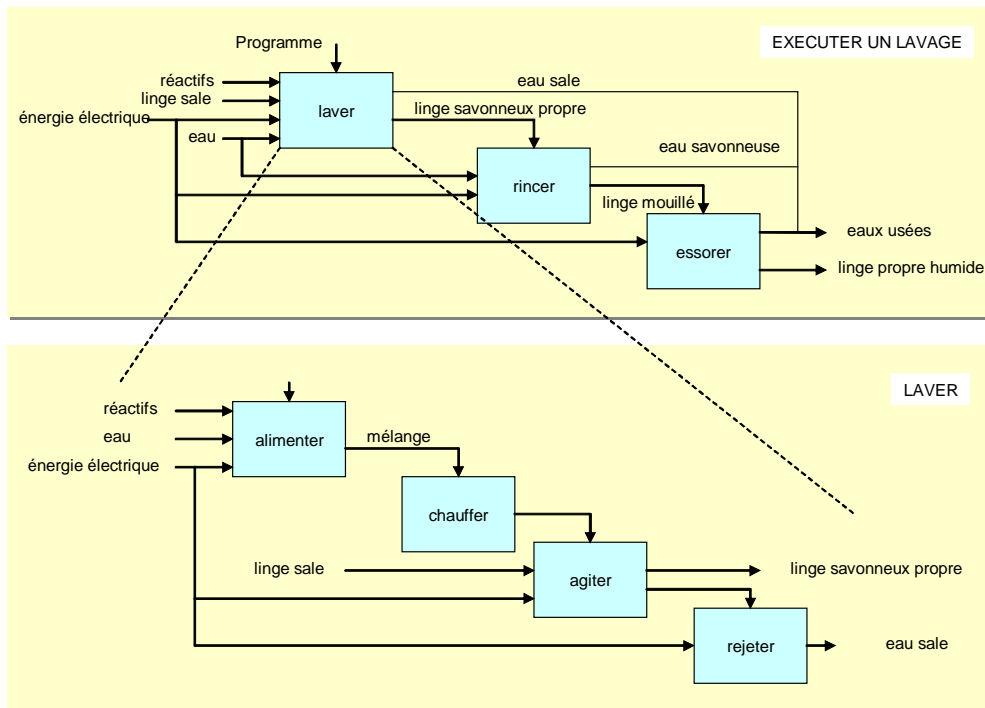


Figure 84 : Représentation SADT de la machine à laver le linge (diagramme global et fonction laver)

Une représentation d'architecture nécessite deux visions corrélées : une vision statique décrivant l'agencement structurel des fonctions ou blocs fonctionnels (Figure 85) et une vision comportementale (dynamique) montrant d'une façon ou d'une autre les enchaînements d'activités de ces fonctions.

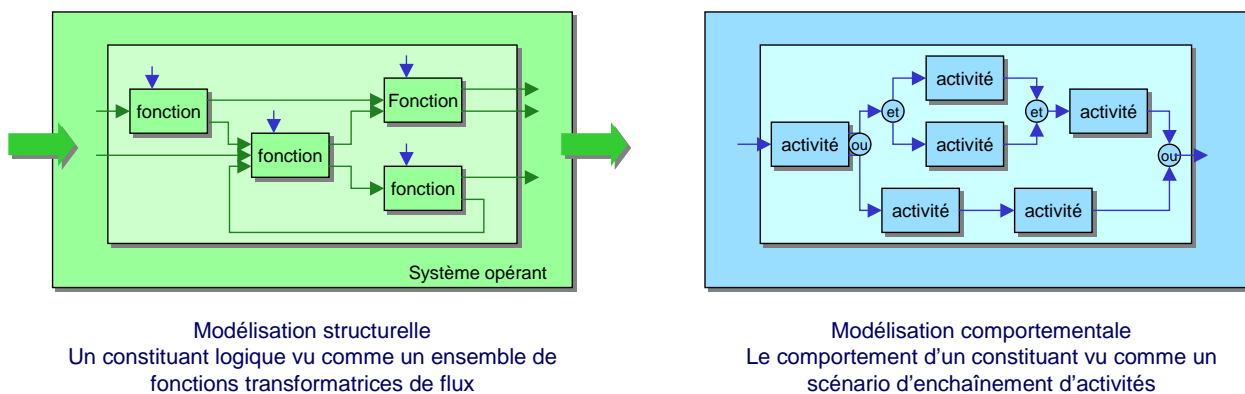


Figure 85 : Diagrammes type en décomposition fonctionnelle

Cette représentation est le résultat d'une analyse (au sens cartésien de décomposition) itérative à la fois structurelle et temporelle : décomposition en blocs fonctionnels de différents niveaux de granularité structurelle ; décomposition en niveaux d'invariance temporelle et analyse comportementale en activités à chacun de ces niveaux).

- ❑ **La vision structurelle de l'architecture logique.** Les diagrammes structurels logiques (s'apparentant aux diagrammes dits **diagrammes de flux de données**), représentant, au niveau de granularité choisi, l'agencement des blocs fonctionnels reliés par les flux (matière, énergie et information) qu'ils transforment. Ils sont issus des diagrammes de flux de données de la décomposition fonctionnelle après avoir fait l'objet de réaménagements logiques, comme par exemple d'ajout de fonctions techniques, de mises en facteur de fonctions, de regroupement de fonctions par exemple pour définir un constituant logique réutilisable, pour représenter un constituant existant à utiliser ou encore pour regrouper des fonctions critiques, etc. Ce

type de diagramme met en évidence les transformations opérantes faites par les fonctions ou modules logiques du système (ce que fait le système) mais en restant dans une vision statique, même si on y fait figurer les **flux de contrôle** (flux informationnels descendants de pilotage des fonctions ou remontants d'état des fonctions).

- ❑ **La vision comportementale de l'architecture logique.** Suivant les besoins, on peut utiliser les différents types de modèles énoncés en 13.3.1.3 : **diagrammes de séquences** pour représenter les séquences d'échanges entre blocs fonctionnels ; **diagrammes d'activités** pour représenter l'agencement temporel (enchaînement, parallélisme) des activités des blocs fonctionnels, **diagrammes état-transition** pour représenter les changements d'états des blocs fonctionnels correspondant aux modifications de leurs activités.

Nous avons choisi d'illustrer cette représentation comportementale par les **diagrammes d'enchaînement d'activités** de type FFBD (fonctionnal Flow Block Diagram) utilisés dans de nombreuses méthodes et outils d'IS (dont CORE pour citer l'un des plus récents...) qui préconisent de faire l'analyse fonctionnelle directement sous forme de décomposition des comportements. Dans la Figure 85 (voir aussi l'illustration concrète Figure 43, reprise Figure 87), le FFBD représente l'enchaînement des activités des fonctions de la vision structurelle (au même niveau de granularité). Ce type de diagramme met en évidence les discontinuités dans les scénarios de fonctionnement (comment évolue le système en réaction aux événements) et montre les différents types d'enchaînements fonctionnels (séquence d'activités, parallélisation d'activités, alternative, itération) qui en résultent.

Notons également que :

- ❑ les diagrammes structurels sont à la base des études d'amélioration d'architecture : c'est à partir de ces représentations qu'on étudie les factorisations de fonction, les regroupements fonctionnels (des fonctions fortement couplées, des fonctions sécuritaires, des fonctions nécessitant des pièces d'usure pour les rechanges...), etc,
- ❑ les diagrammes comportementaux sont notamment à la base des études de vérification et validation : il faut, en principe, vérifier et valider le système dans tous ses comportements possibles.

13.3.2.3 Vision organique et physique

Les aspects comportementaux étant déjà traités au niveau fonctionnel, il s'agit maintenant de représenter les arborescences de constituants (organes) et leurs architectures structurelles aptes à réaliser les fonctions de l'architecture fonctionnelle dans tous ses comportements spécifiés.

- ❑ Au fur et à mesure de la conception physique, on complète l'arbre des constituants en fonction des choix de conception physique, du fait de l'apparition de nouvelles fonctions (fonctions techniques, d'interfaces, de gestion des redondances pour parallélisme ou sécurité, d'aide à la maintenance, etc...), et donc de nouveaux organes. Notons que l'arbre des produits à réaliser se déduit de l'arborescence de décomposition en constituants physiques en rajoutant les produits dits contributeurs associés à chaque constituant.
- ❑ Les architectures structurelles montrent les organes et leurs liens d'interfaces. A partir d'un certain niveau de détail, les formalismes de représentation deviennent dépendants des technologies, dans la mesure où l'on approche des aspects physiques : plans de fabrication mécanique, de déploiement d'infrastructures, de câblage, dessin de masques de circuits intégrés, architecture logicielle ...

13.3.3 Visions de synthèse des approches de modélisation systémique

Pour se repérer face à la multitude de types de modèles et systèmes de modélisation, nous nous proposons, dans ce chapitre, de prendre un peu de hauteur à travers la présentation de grilles ou cadres de modélisation des systèmes, avec :

- ❑ la synthèse des approches traditionnelles de modélisation systémique (synthèse du chapitre précédent), sous forme d'une grille de modélisation, avec en incidence l'adaptation aux systèmes d'information,
- ❑ l'approche qui devient dominante autour de SysML,

- ☐ une grille pour prendre de la hauteur de vue : la grille systémique de la méthode Sagace,
- ☐ une grille fondatrice pour les systèmes sociaux techniques : le cadre de Zachman.

13.3.3.1 Synthèse des approches traditionnelles

La Figure 86 visualise la position de ces différentes représentations d'un système dans le processus d'analyse et conception d'un système selon l'approche fonctionnelle traditionnelle.

Elle indique succinctement les activités « descendantes » d'ingénierie associées ou conduisant aux différents niveaux successifs (opérationnel, fonctionnel, physique) de représentation. Elle met en évidence (flèches montantes) les besoins en cohérence verticale qui font l'objet d'opérations de V et V. Elle suggère les besoins de cohérence horizontale entre vues structurelles et vues comportementales.

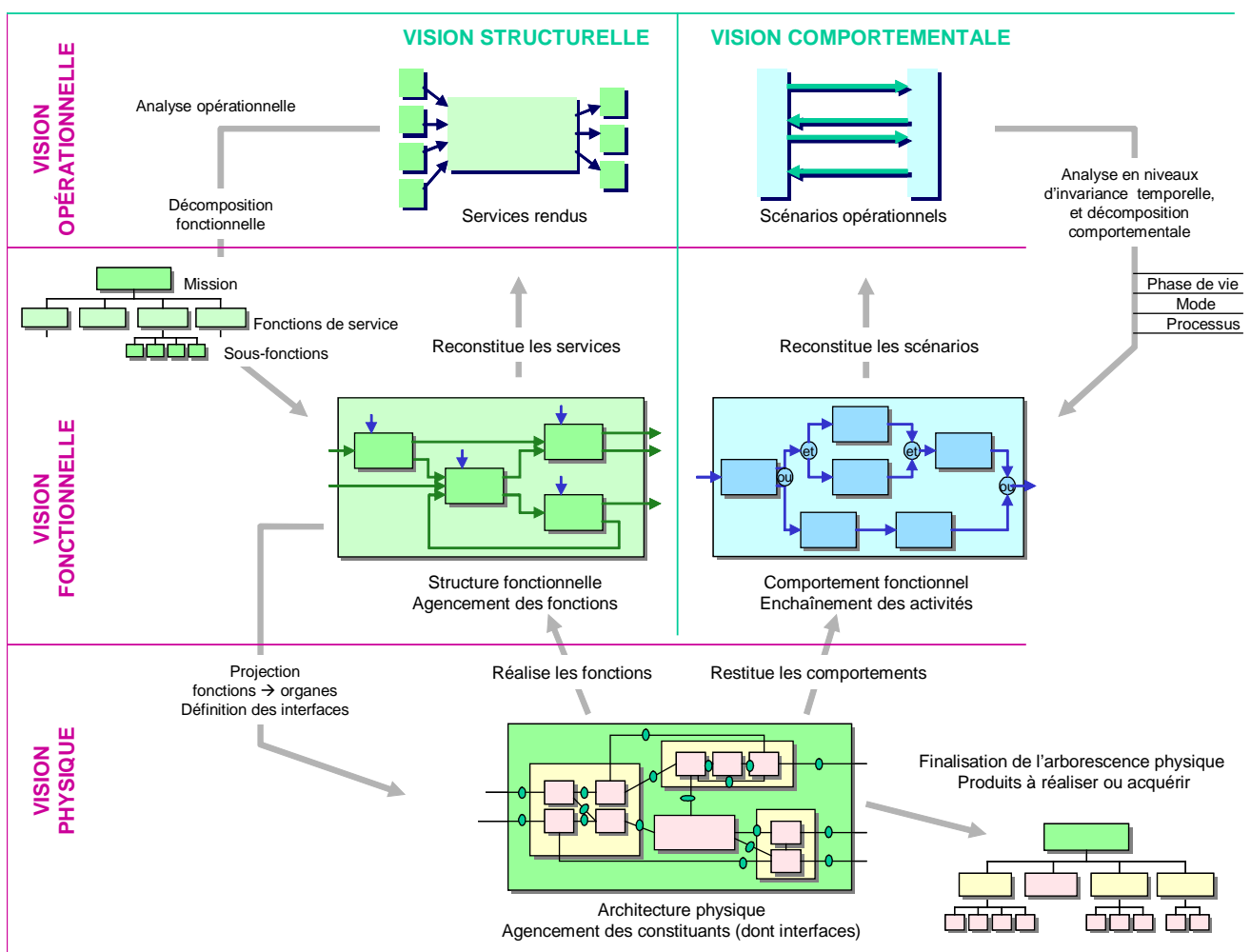


Figure 86 : Grille schématique de la représentation des systèmes (approche traditionnelle)

La Figure 87 illustre succinctement cette grille, en fournissant un exemple volontairement succinct de modélisation de la machine à laver le linge, réduit ici à une représentation possible de son système opérant. Notons qu'il resterait à modéliser le sous-système de pilotage : structure et fonctionnement du programmeur qui a pour but, selon le programme qui lui a été fourni, de déclencher les activités (ses sorties événementielles) en fonction des événements externes ou internes (ses entrées événementielles) et de les réguler (ses sorties continues) en fonction des valeurs constatées (ses entrées continues).

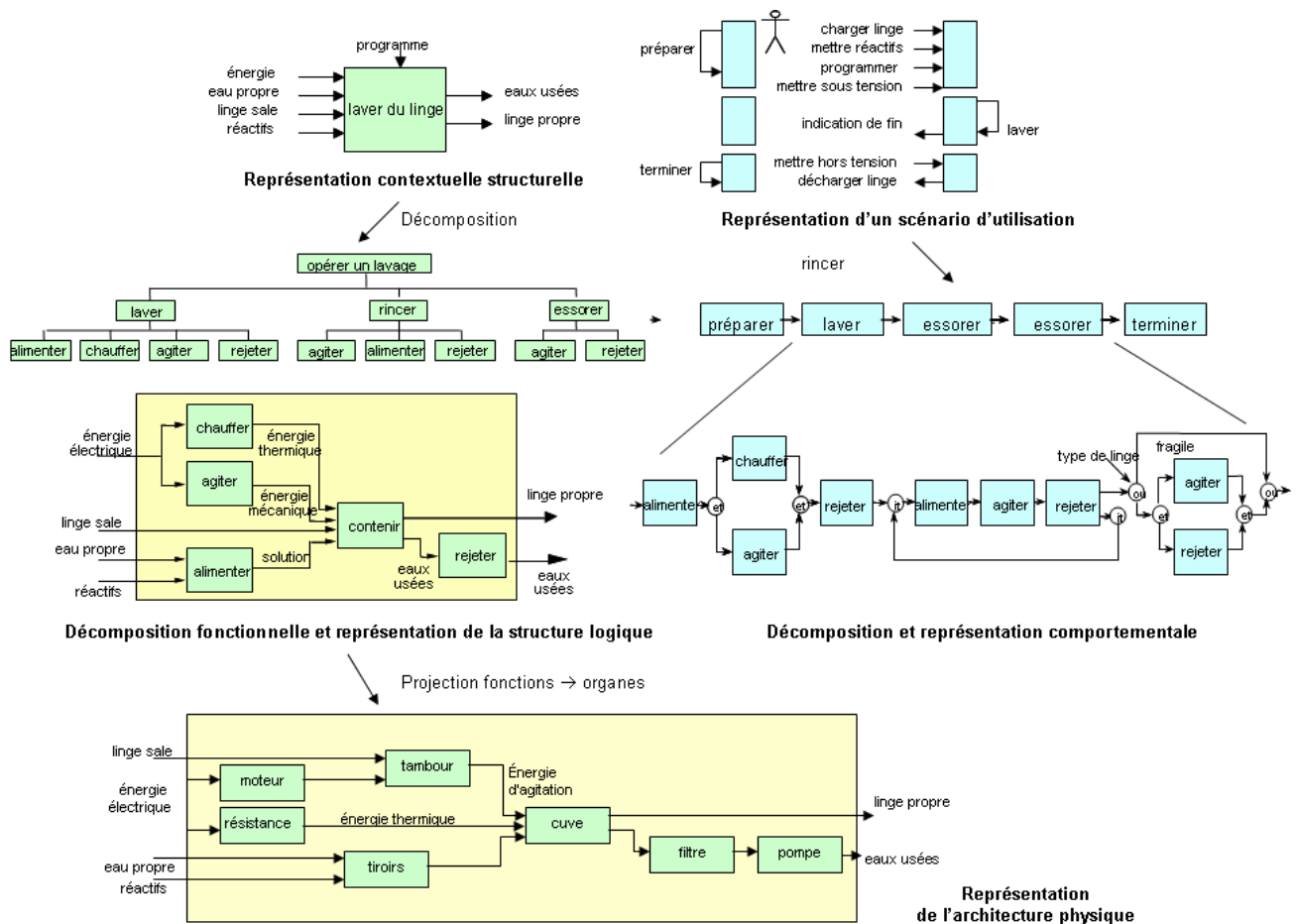


Figure 87 : Illustration de la grille sur la machine à laver le linge

Le cas des systèmes d'information

Nous n'entendons pas ici traiter de la modélisation des systèmes d'information, mais simplement indiquer quelques éléments.

L'approche fonctionnelle décrite ci-dessus (13.3.2) et traduite dans la grille (Figure 86) s'est appliquée dans les années 70-80 à l'analyse et la conception des systèmes d'information en vue de l'analyse fonctionnelle et de la conception structurelle du logiciel. Exemples : méthodes SA-SD (Structured Analysis-Structured Design), SADT, ou les premières versions de FFBD.

Pour les systèmes orientés traitement de données, comme les systèmes d'information d'entreprise, on a adjoint des modèles dits de données (modèles entité-relation ou entité-relation-attribut) représentant structurellement la sémantique du problème (les entités du monde réel à traiter, leurs relations, les données qui les caractérisent) et débouchant sur la structuration des bases de données. Exemple : méthodes IDEF1 (SADT + modèle ER), Merise (modèle de traitement proche des FFBD et modèles de données ER).

Pour les systèmes de conduite en temps réel (contrôle-commande), notamment les systèmes de contrôle commande très réactifs, on a associé aux modèles structurels des modèles précis de comportement tels que les diagrammes état-transition. Exemples : méthode IDEF2 : SADT + diagramme d'états, méthodes SART (Structured Analysis-Real Time) ou StateMate.

Depuis le milieu des années 90, les approches dites « par objet » d'analyse et de conception des systèmes d'information ont peu à peu remplacé les approches dites fonctionnelles. À défaut de convergence des méthodes, le langage de modélisation a été standardisé sous la dénomination UML (*Unified Modeling Language*).

13.3.3.2 L'approche fondée sur SysML

A première vue, la taxonomie des diagrammes de SysML semble englober toutes les approches traditionnelles pour les besoins de modélisation générale des systèmes du ressort de l'IS, en utilisant les diagrammes d'UML2 en tant que de besoin pour détailler le sous-système d'information. En relation avec l'approche traditionnelle décrite ci-dessus, les possibilités de représentation offertes par les différents types de diagrammes de SysML, dont la taxonomie est rappelée Figure 88, peuvent être illustrées comme suit :

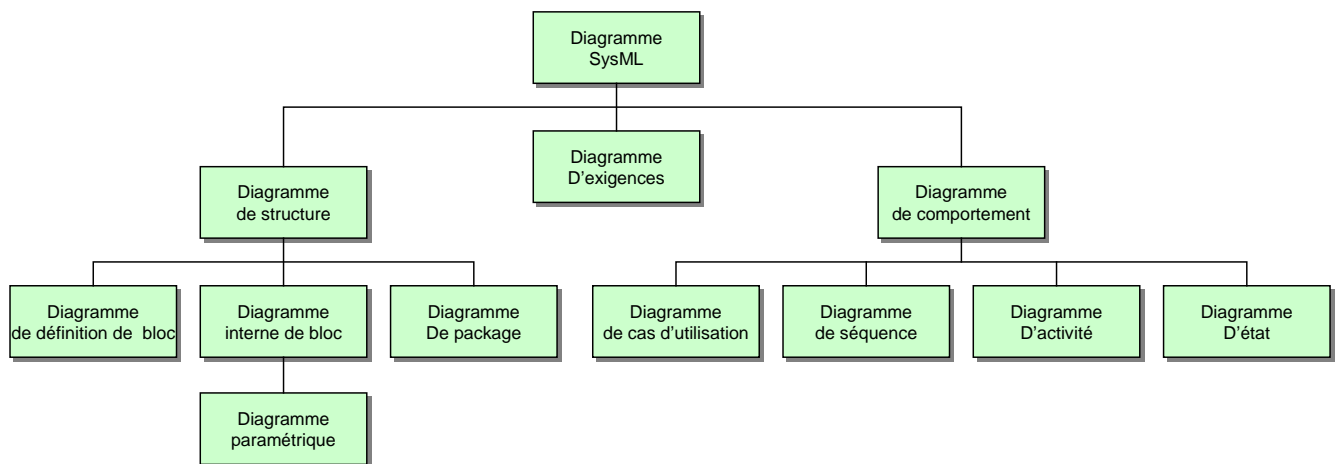


Figure 88 : Taxonomie des diagrammes de SysML

- ☐ Le diagramme d'exigences (*requirement diagram*) offre la possibilité de représentation des modèles prescriptifs successifs du système et de ses constituants, non seulement en vue de la capture et de l'analyse des exigences mais aussi pour toutes les opérations tant d'allocation que de vérification et validation tout au long du développement.
- ☐ Le diagramme de définition de bloc (*block definition diagram*) représente le bloc (système, constituant fonctionnel ou physique) dans son environnement avec ses ports d'échanges de flux. Les blocs ont vocation à être les nœuds de l'arborescence système.
- ☐ Le diagramme interne de bloc (*internal block diagram*) montre la structure interne du bloc : l'arrangement des constituants du bloc et leurs échanges de flux.
- ☐ Le diagramme paramétrique (*parametric diagram*) offre la possibilité de spécifier les fonctions d'un bloc sous forme mathématique (permet notamment d'exprimer le continu).
- ☐ Le diagramme de package (*package diagram*) offre une représentation sous forme d'emboîtement de l'arborescence des constituants du système. Ils permettent de gérer des configurations de modèles et des droits sur des unités de configurations de modèles.
- ☐ Les cas d'utilisation (*use case*) mettent en évidence les service rendus par le système aux éléments (acteurs) de l'environnement.
- ☐ Le diagramme de séquence (*sequence diagram*) permet de représenter tout scénario d'échange entre constituants ou constituants et éléments externes.
- ☐ Le diagramme d'activité (*activity diagram*) offre une représentation comportementale sous forme d'enchaînement d'activités.
- ☐ Le diagramme d'état (*state diagram*) offre une représentation comportementale sous forme de réaction aux stimuli externes ou internes.

A première vue l'objectif d'universalité du langage semble atteint : on retrouve tous les types de modèles traditionnels des systèmes, avec un formalisme précis les rendant cohérents, en notant l'adjonction des diagrammes d'exigences permettant d'associer l'ingénierie des exigences ainsi que celle des diagrammes paramétriques permettant d'adjoindre des modèles analytiques en vue de simulation.

Il reste à développer des démarches méthodologiques cohérentes d'utilisation et d'intégration de ces modèles pour concevoir des systèmes et les simuler. C'est le rôle des méthodes et outils qui sont développés autour de SysML. Le formalisme fort du langage SysML et des ponts entre les outils de support de SysML et des outils de simulation numérique ou de conception métier (mécanique, électronique par exemple) permettent d'envisager de multiples formes de simulation et de pousser la conception jusqu'aux plans et méthodes de production.

13.3.3.3 Une grille générique d'analyse des systèmes complexes

L'approche, certes nécessaire, par une multiplicité des points de vue sur le système, donc par de multiples modèles, ne doit pas faire perdre de vue que le système est un tout et que nous avons besoin d'une grille intégratrice et structurante dès lors que nous abordons des systèmes complexes.

La grille de la Figure 86 enchaînant les visions opérationnelle, fonctionnelle et organique selon le processus « descendant » donc par principe analytique d'ingénierie, n'apporte que partiellement cette vision systémique, et nous avons d'ailleurs noté les besoins de cohérence.

La méthode Sagace propose une grille systémique utile pour penser globalement système et intégrer les points de vue (c'est en fait une façon de formaliser à un plus haut niveau d'abstraction la représentation du système donnée par la Figure 16 de la partie 1).

Nous ne faisons ici que présenter la grille fondamentale de la méthode (en utilisant une terminologie cohérente avec celle utilisée au sein du présent document) et les besoins en modélisation qu'elle sous-tend. Nous n'abordons ici ni le système de modélisation ni l'ensemble de la démarche méthodologique propre à la méthode et qui garantit la cohérence entre les multiples points de vue.

Ce que fait le système	1 Fonctions opérantes	4 Fonctionnement	7 Evolution
Ce qu'est le système	2 Organes opérants	5 Organes de commande du fonctionnement	8 Organes de commande de reconfiguration
Comment le système se pilote	3 Régulation	6 Pilotage tactique	9 Pilotage stratégique
	Le système s'équilibre	Le système fonctionne	Le système s'adapte

Figure 89 : Grille d'analyse des systèmes complexes (inspirée de la méthode Sagace)

La grille se présente sous forme d'une matrice à 9 cases, correspondant à 9 points de vue sur le système (voir Figure 89)

- ☐ les lignes représentant trois visions :
 - fonctionnelle : ce que fait le système,
 - organique : comment est constitué le système,
 - opérationnelle : comment se pilote le système (que le pilotage soit interne ou externe),
- ☐ les colonnes permettant de croiser ces visions avec l'aspect temporel :
 - achronique : le système s'équilibre avec son environnement à tout instant,
 - synchronique : le système fonctionne (enchaîne ses modes et ses activités de fonctionnement en se synchronisant sur l'environnement),
 - diachronique : le système s'adapte et évolue (se restructure pour faire face à de changements de mission ou d'environnement).

Cette grille constitue le cadre de départ pour modéliser le système, aux différents niveaux de granularité de décomposition dans chaque case, en partant d'un diagramme de contexte adapté au point de vue propre à chacune des cases.

Case	Représentation
case 1	les fonctions opérantes du système, vues comme transformatrices de flux opérants, par exemple sous forme de diagrammes d'architecture fonctionnelle structurelle, tels que diagrammes de flux (de données) ou diagrammes de blocs,
case 2	les organes opérants du système réalisant les fonctions opérantes : représentation structurelle de l'architecture organique/physique du système opérant,
case 3	les fonctions d'élaboration des variables de régulation applicables aux fonctions opérantes (et donc aux organes opérants) pour équilibrer au mieux le système avec son environnement,
case 4	le fonctionnement du système sous forme d'enchaînement des modes et activités de fonctionnement réalisées par les fonctions opérantes, par exemple avec des diagrammes de types enchaînement d'activités ou diagrammes d'états,
case 5	les organes de commande du fonctionnement (sous-système de pilotage),
case 6	les fonctions d'élaboration des commandes du fonctionnement : changements de modes ou d'états, déclenchements et arrêts d'activités, changements de lois de régulation d'une même activité...
case 7	les évolutions du système sous forme de scénarios d'enchaînement des phases de vie et conditions d'emploi
case 8	les organes permettant les restructurations du système pour s'adapter aux nouvelles conditions d'emploi : organes de reconfiguration, système logistique de redéploiement...
case 9	les fonctions d'élaboration des décisions stratégiques d'adaptation du système aux évolutions de mission et d'environnement (même si ces fonctions sont rarement automatisables, leur analyse et leur modélisation est nécessaire pour définir les scénarios stratégiques, les simulateurs de commandement...)

Figure 90: Les 9 cases de la grille SAGACE

Si nous présentons cette grille systémique, alors que la méthode Sagace qui garantit la cohérence globale de la modélisation est, à ce jour, insuffisamment outillée pour être préconisée, c'est qu'elle apparaît comme un guide générique pour tout système complexe.

- ☐ Elle guide les études amont et d'analyse du problème dans le cas des systèmes complexes. En particulier, la réflexion sur la troisième colonne, qui concerne l'évolution et l'adaptation du système, est particulièrement utile pour les systèmes aux missions et en environnement peu prédictibles, comme le sont beaucoup de systèmes socio-techniques, par exemple, les systèmes de défense militaires ou civils (lutte contre les catastrophes naturelles, les catastrophes sanitaires, le terrorisme...).
- ☐ Elle structure la modélisation : aide à un consensus sur la structure du problème et de la solution et permet à chaque participant d'investiguer le système à travers les modèles dans les différentes cases.

13.3.3.4 Un cadre pour les systèmes socio-techniques

Le besoin de représentations adaptées à la recherche de maîtrise des systèmes socio-techniques (et notamment d'optimisation des processus métier via le système d'information) a conduit à définir des **cadres de**

représentation (*frameworks* en anglais) auxquels peuvent être associés des méthodes, types de modèles et des outils de spécification et d'analyse. Ces cadres sont fondés sur l'approche systémique des organisations.

Le cadre le plus connu, pour structurer ce qu'il est convenu d'appeler « l'architecture d'entreprise », est le cadre de Zachman (origine IBM).

Ce cadre, illustré *Figure 91*, est structuré selon une grille à deux dimensions avec :

- ❑ 6 colonnes correspondant aux six questions structurantes de base : quoi ? comment ? où ? qui ? quand ? pourquoi ?
 - quoi ? Les données : la caractérisation des objets importants du monde de l'entreprise, par exemple les données de ses métiers,
 - comment ? Les processus : les fonctions exécutées sur ces données, les organes pour les exécuter,
 - où ? Le réseau : les sites où se déroulent ces processus ;
 - qui ? Les hommes : entités de l'organisation concernés par ces processus ;
 - quand ? Le temps : événements significatifs pilotant le déroulement des processus du système d'information ;
 - pourquoi ? La motivation : objectifs et stratégies de l'organisation.
- ❑ 5 lignes correspondant aux préoccupations de cinq types de parties prenantes : le planificateur, le responsable, le concepteur, le réalisateur, le sous-contractant (qui ne voit qu'une partie de l'ensemble).
 - le planificateur : la portée, vision contextuelle : décrit le contexte opérationnel, les dimensions stratégiques qui ont des impacts sur les capacités du système d'information ;
 - le modèle métier, vision conceptuelle : décrit les processus métier ;
 - le modèle du système, vision logique : décrit ou représente l'architecture applicative indépendante de l'implémentation, comprenant, entre autres les modèles conceptuels des données ;
 - le modèle technologique, vision physique : décrit des représentations techniques, liées à l'implémentation, par exemple les modèles physiques des bases de données ;
 - les représentations détaillées, hors contexte : traite des informations qui concernent les sous-contractants.

Point de vue	Représentation	Quoi Données	Comment Fonctions	Où Réseau	Qui Personnel	Quand Temps	Pourquoi Stratégie
Planificateur	Ensemble (Contexte)	Objets du métier	Processus du métier	Localisations géographiques	Grandes lignes organisation	Événements significatifs	Finalité et stratégies
Responsable Propriétaire	Modèle métier (Conceptuel)	Modèle sémantique métier	Modèles des processus métier	Logistique support des métiers	workflow	Planning maître des processus	Business plan
Concepteur	Modèle système (Logique)	Modèle logique de données	Architecture applicative	Architecture système distribué	Architecture des IHM (rôles-produits)	Structure temporelle des traitements	Modèle des règles métier
Constructeur	Modèle technologique (Physique)	Schémas des bases de données	Architecture logiciel applicatif	Architecture technologique	Architecture de présentation des IHM (individus-écrans)	Structure des activités	Règles métiers
Sous-contractant	Représentations détaillées (Hors contexte)	Définition des données	programmes	Architecture réseau	Architecture de sécurité	Chronogrammes	Spécification des règles

Figure 91 : Cadre de Zachman pour la description d'une architecture d'entreprise (vision simplifiée)

Remarques :

- ✓ *Il n'existe pas de méthodes ou d'outils pour renseigner de manière formelle et cohérente chacune des vues de ce tableau.*
- ✓ *Un domaine est à noter particulièrement : celui de la modélisation des processus métier qui fait l'objet du Business Process Modeling. Par exemple, la BPMN (Business Process Modeling Notation) de la BPMI (Business Process Management Initiative) de l'OMG (Object Management Group) spécifie une représentation des processus.*

Dans le prolongement du cadre de Zachman, d'autres cadres ont été proposés pour le compléter ou le préciser ou le spécialiser à un contexte ou à un objectif particulier. Par exemple dans le domaine militaire on peut citer DODAF, MODAF, NAF et AGATE pour respectivement les USA, la Grande Bretagne, l'OTAN et la France.

13.4 La maîtrise des risques

Tout projet est susceptible de subir des aléas risquant de mettre en cause ses objectifs (résultats attendus, coûts, délais). On distingue quelquefois les **risques système** ou risques techniques susceptibles d'avoir des impacts sur l'obtention des objectifs techniques (risque de ne pas tenir les exigences) des **risques projet** proprement dits susceptibles d'avoir des impacts sur la tenue des autres objectifs plus spécifiques au projet (contraintes de coûts et délais, objectifs d'acquisition de notoriété, d'acquisition de nouvelle technologie...). Leur prévention fait l'objet du management des risques du projet qui consiste à assurer la sécurité du projet en anticipant l'arrivée d'événements redoutés pour chercher à les éviter ou à limiter leurs conséquences. C'est l'objet de ce présent chapitre.

Le système cible en exploitation (incluant son système de soutien opérationnel) est également soumis à des aléas risquant de mettre en cause sa mission, son intégrité ou de causer des dommages à son environnement. La prévention de ces risques système est préparée dans la phase d'ingénierie du système par des études de sûreté de fonctionnement et de sécurité qui se perpétuent tout au long de la phase d'exploitation. Ces études, pour lesquelles la base conceptuelle concernant la maîtrise des risques développée dans ce chapitre reste valable, font l'objet du chapitre 13.6.

Notons des maintenant quelques caractéristiques de la maîtrise des risques projet :

- ❑ Elle revêt un aspect stratégique : un risque important sur un projet stratégique peut représenter un risque majeur pour l'entreprise ou les entreprises concernées, tandis qu'un changement de stratégie d'entreprise peut représenter un risque pour les projets en cours.
- ❑ Elle porte sur tous les aspects : le système à faire, les processus de tout son cycle de vie, les organisations et leurs acteurs, les humains (compétences, formation), les méthodes et outils (efficacité, compétence...), les relations entre acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, sous-traitants), entre équipes, entre humains, et, de manière générale, l'environnement au sens large du projet.
- ❑ A ce titre, elle concerne et/ou implique toutes les parties prenantes.
- ❑ Elle débute avant le projet : études amont d'opportunité et faisabilité, décision de démarrer, appel d'offres, décision de réponse à l'appel d'offres, choix du titulaire, rédaction du marché et ses clauses...). Un projet mal engagé est toujours un projet risqué.
- ❑ Elle évolue tout au long du projet et, même si la typologie des risques évolue au fil des phases du cycle de vie, ceux-ci doivent être anticipés dans les phases antérieures. En principe le risque global diminue au cours du projet car les incertitudes importantes au début sont levées progressivement à mesure de l'avancement. Cependant tout problème rencontré peut générer de nouveaux risques.
- ❑ Elle est intimement liée à l'ingénierie de système et ses processus
 - Elle est en rapport étroit avec l'ingénierie des exigences qui apparaît comme un moyen fondamental pour analyser et réduire les risques concernant les exigences du système à faire, les exigences du projet pour le faire, les exigences de leurs environnements respectifs plus ou moins contraints.

- Elle est à l'évidence liée aux processus de V & V qui par principe réduisent les risques techniques, inversement toute omission dans les opérations de V & V ou tout maillon faible dans leur couverture de tests entraîne un risque.
 - Elle est partie prenante des processus d'évaluation/comparaison et optimisation préparant les décisions : on ne peut comparer des solutions sans tenir compte des risques associés.
- ❑ Elle est liée au management des opportunités (des chances à saisir qui apparaissent comme le complément positif des risques). Quand un risque est pris volontairement c'est qu'on en espère un gain ; choisir de bénéficier d'une opportunité, c'est estimer ses risques acceptables ; ne pas profiter d'une opportunité qui se présente conduit à prendre des risques pour l'avenir (par exemple vis-à-vis du danger de la concurrence). De là vient la tendance actuelle de grouper le **management des risques** et celui **des opportunités**, toute décision résultant d'un arbitrage entre solutions au vu des opportunités de gain et risques de perte.

« Le risque est le hasard d'encourir un mal, avec espérance, si nous en échappons d'obtenir un bien ».
Abbé Etienne Bonnot de Condillac (1715 - 1780).

La problématique des risques étant ainsi, à juste titre, très sensible pour les grands programmes et projets (et s'appliquant également aux risques système en exploitation par exemple en aéronautique, transport public, nucléaire...), il s'est développé une approche assez formalisée de la discipline dont ce chapitre cherche à rendre compte, au moins dans ses grandes lignes. Il faut évidemment l'ajuster au cas des projets de moindre envergure où il faut savoir faire appel au bon sens et au pragmatisme de l'ingénieur ainsi qu'à sa capacité à prioriser et à faire les bons choix en s'appuyant sur son expérience et son feeling.

13.4.1 Les concepts de la maîtrise des risques

La Figure 92 relie les principaux concepts liés à la notion de risque. Le projet et ses éléments (tâches équipes, biens...) présentent des **vulnérabilités** (sensibilités), susceptibles d'être exploitées par des **menaces** (dangers, périls). La concrétisation d'une menace peut avoir des impacts sur le projet en provoquant des conséquences préjudiciables pour ses objectifs (résultats, coûts et délais).

Le risque se définit comme le degré d'exposition du projet à des **événements redoutés** dont l'apparition conduit à ne plus respecter les objectifs ce qui peut être source de préjudices inacceptables.

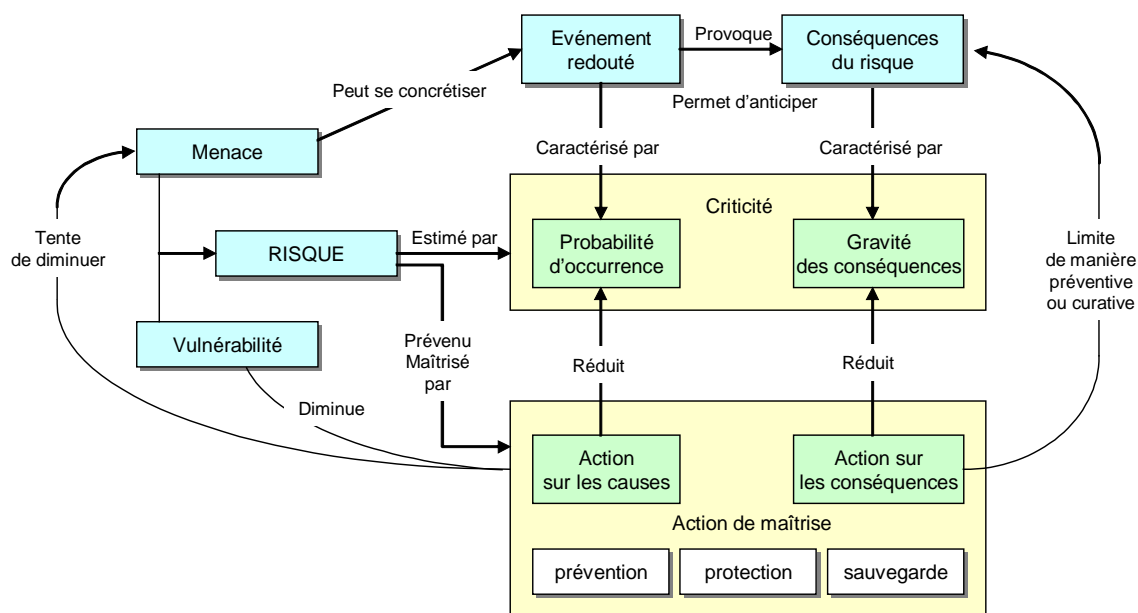


Figure 92 : Concepts de la maîtrise des risques

Le risque global du projet apparaît alors comme la combinaison des risques possibles, chacun d'eux étant le produit d'une menace M_i par la somme des vulnérabilités V_{ij} des éléments du projet à cette menace (en négligeant ici des effets systémiques comme ceux de l'interaction entre risques) :

$$\text{Risque global} = \sum_i (M_i \times \sum_j V_{ij})$$

Un risque est mesuré à partir de deux éléments :

- ☐ la **probabilité d'occurrence** (ou de survenance) de l'événement redouté concrétisant une menace,
- ☐ la **gravité** (ou sévérité) **des conséquences** sur le projet et ses résultats,

On appelle **criticité** d'un risque le produit de la probabilité d'occurrence par la gravité des conséquences :

$$\text{Criticité} = (\text{probabilité d'occurrence}) \times (\text{gravité des conséquences})$$

Le résultat de l'analyse des risques peut impliquer des décisions stratégiques majeures sur le projet telles que changement de politique ou de type de management, modification de l'orientation et des objectifs du projet, voire arrêt du projet.

En dehors de ces cas extrêmes, la **maîtrise des risques** va consister à surveiller l'évolution des risques et tenter de réduire les effets des risques dépassant le seuil d'acceptabilité par des **actions de maîtrise** appropriées.

Les actions de maîtrise (quelquefois appelées parades) :

- ☐ ont pour objectif de diminuer la criticité en diminuant l'une, l'autre ou l'ensemble de ses deux composantes :
 - la probabilité d'occurrence,
 - la gravité des conséquences,
- ☐ peuvent agir
 - sur la **vulnérabilité** (les éléments sensibles du projet),
 - sur la **menace** (éléments agressifs) ou les flux agressifs,
- ☐ se conforment à trois principes :
 - prévention pour limiter l'apparition d'événements redoutés qui pourraient conduire à des conséquences inacceptables, en agissant sur la probabilité d'occurrence de l'élément redouté,
 - protection pour maintenir néanmoins l'état final du projet dans des limites acceptables par rapport à ses objectifs, en agissant sur la gravité des conséquences potentielles et sur l'occurrence d'un contexte redouté qui pourrait conduire à sortir de ces limites,
 - sauvegarde en cas de dépassement des limites acceptables pour limiter au mieux l'ampleur des conséquences sur l'état final.

en termes plus parlant, on prévient pour limiter l'apparition de l'événement redouté, on protège pour que l'arrivée de l'élément redouté ne conduise à un contexte redouté catastrophique, on sauvegarde ce qui peut encore l'être en cas de survenance de catastrophe.

Ces principes peuvent être activés en permanence ou s'activer à la détection d'une situation particulière (alerte pouvant conduire à l'événement redouté, apparition de l'événement redouté ou du contexte catastrophique).

- ☐ doivent être planifiées et déclenchées en temps utile. On cherche à détecter au plus tôt et si possible anticiper l'arrivée des événements et contextes redoutés par la mise en place d'indicateurs d'alertes.
- ☐ doivent être proportionnées aux conséquences des risques qu'elles traitent.

13.4.2 Les activités de management des risques

Le processus de maîtrise des risques est un processus itératif selon le cycle PDCA qui se déroule tout au long du projet. Son management se place à deux niveaux :

- ❑ Au niveau stratégique, il s'agit :
 - au lancement de projet, de définir la stratégie de maîtrise des risques,
 - aux principaux jalons du projet, de prendre en compte les résultats des analyses de risques remontés par les revues dans ses décisions concernant la suite du projet et de valider les plans d'action en maîtrise de risque,
 - au fil du projet, de se tenir au courant de l'évolution des risques majeurs, de déclencher des audits si nécessaire, et de prendre les décisions correspondantes.

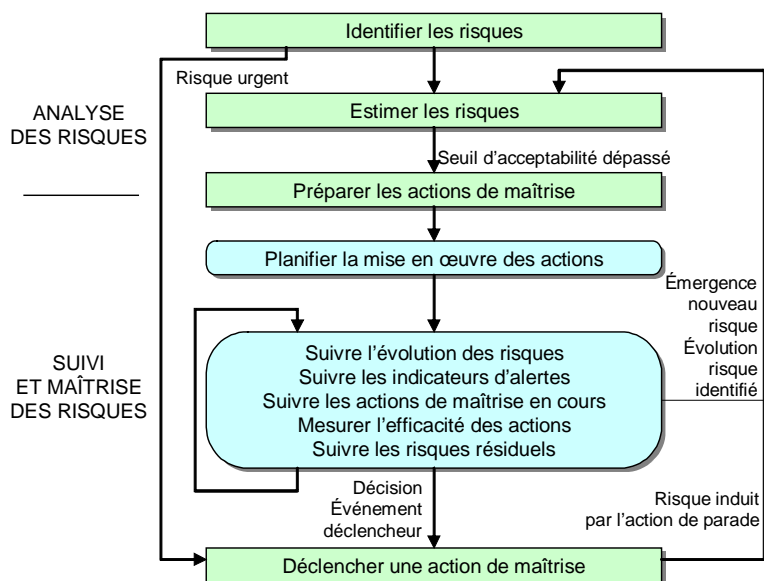


Figure 93 : Les activités de management des risques

- ❑ Au niveau opératoire et action, les principales activités du processus de maîtrise sont les suivantes (voir Figure 93) :
 - Activités d'analyse des risques consistant à identifier les risques, estimer leur criticité, décider de leur acceptabilité, définir et estimer les actions possibles face aux risques inacceptables, ainsi que les alertes conditionnant leur déclenchement, établir les compromis, arbitrer, proposer les plans d'actions.
 - Activités de suivi des risques consistant à suivre les occurrences d'événements (alertes, sinistres), à suivre les risques résiduels, à détecter et identifier les nouveaux risques.
 - Actions de maîtrise des risques, fortement imbriquées aux précédentes, consistant à planifier les actions en diminution de risque, à en décider le déclenchement, à en gérer le déroulement et enfin à en vérifier l'efficacité.

13.4.3 Les bases de l'analyse des risques

Par principe, la notion de risque implique une incertitude, un élément redouté. Si l'on excepte les causes purement accidentelles (sinistres), les **facteurs de risques** sont donc d'abord des facteurs d'incertitude : incertitude sur la stabilité du besoin, de l'environnement et de la mission du système, incertitude sur la faisabilité technique ou sur la maturité des technologies, incertitude sur la qualité des équipes projet ou sur la fiabilité des sous-traitants, incertitude sur la fabricabilité industrielle (répétitivité et la fidélité des procédés) etc... A ceci s'ajoute les facteurs liés à la complexité. Certes, la complexité ne constitue pas un risque au sens propre du terme puisqu'elle est une donnée du problème, un fait avéré et non un aléa redouté. Par contre elle constitue un facteur évident d'accroissement des risques : complexité et indéterminisme de l'environnement du système, complexité et criticité de ses missions, complexité des technologies et procédés industriels, complexité due au facteur humain dans le système, complexité de l'organisation industrielle du programme, etc.

Ces facteurs de risques ont un caractère fondamentalement systémique : les risques émergent de tensions ou interactions conflictuelles entre les contraintes d'objectifs et de ressources pesant sur le projet et tout problème sur la tenue d'un objectif ou d'une contrainte peut se répercuter sur la tenue des autres.

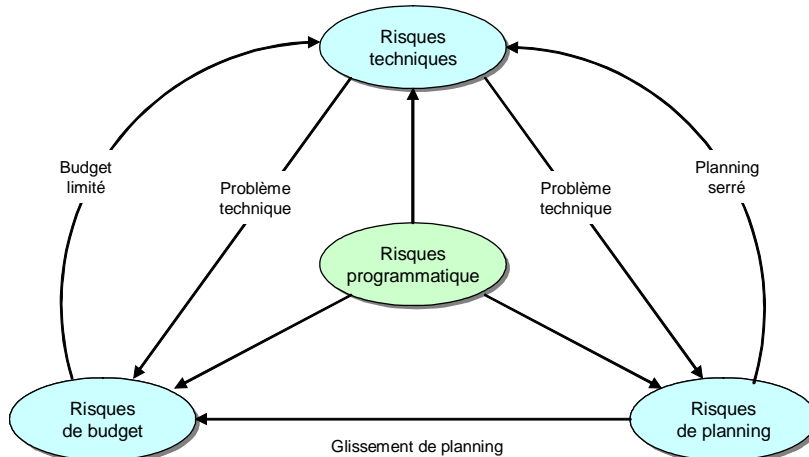


Figure 94 : Interactions entre catégories de risques (source INCOSE)

La Figure 94 synthétise cet aspect en montrant les interactions entre les trois catégories typiques de risques projet (non tenue des objectifs techniques, des contraintes de coût et des contraintes de planning) avec les effets des « risques programmatiques ». Ceux-ci correspondent aux contraintes managériales imposées de l'extérieur au projet telles que : instabilité ou réorientation des objectifs techniques (changement de mission, nouveau besoin, nouvel environnement...), abandon de projets collatéraux dont on comptait utiliser les résultats, répercussions d'économie budgétaires, changement de priorité du projet jouant sur l'affectation des ressources, effets de réorganisation d'entreprise ou de changement de politique de partenariat et sous-traitance, etc.

13.4.4 Identification et caractérisation des risques

Le but de l'identification des risques est de recenser les risques susceptibles d'affecter les activités en portant atteinte à la tenue des objectifs du projet, de déterminer leurs caractéristiques et de les hiérarchiser en fonction de leur niveau de criticité afin de déterminer les priorités concernant les actions en diminution de risque. Toutes les parties prenantes sont concernées par l'identification des risques.

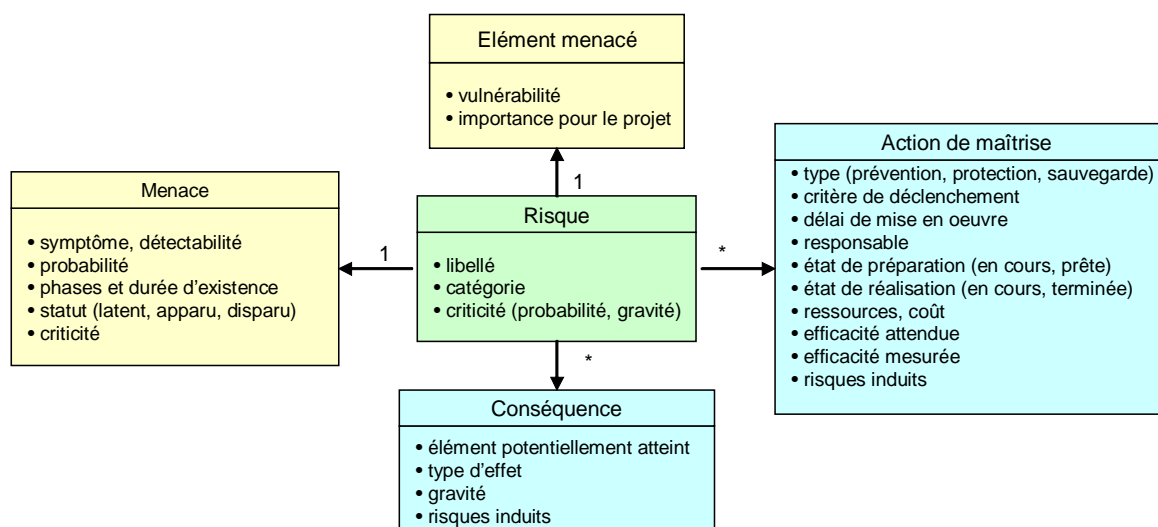


Figure 95 : Caractérisation d'un risque

La Figure 95 présente un modèle de données caractérisant un risque en mettant en évidence les caractéristiques propres à la menace, à l'élément menacé et aux conséquences (les actions de maîtrise font l'objet d'un paragraphe ultérieur).

La plupart des projets reprennent des éléments de projets précédents : nouvelle combinaison d'éléments, mêmes types d'éléments avec évolution des performances ou de technologie... La prise en compte des retours d'expérience des projets précédents de profil similaire (observatoire des risques) constitue alors le fondement de l'identification des risques sous réserve de tenir compte des effets des évolutions (architectures, performances, technologies) sur les différents risques précédemment identifiés ou constatés et de l'émergence des nouveaux risques propres à ces évolutions.

Les projets novateurs ou les aspects novateurs des projets nécessitent une analyse pluridisciplinaire des causes potentielles (menaces et vulnérabilités), des conséquences prévisibles, des opportunités d'évitement des risques (solution alternative moins risquée).

Cette analyse peut utiliser différentes approches complémentaires, par exemple :

- ❑ à partir de *check lists*, par exemple liste des facteurs d'incertitude et de complexité à croiser avec les éléments susceptibles de présenter des vulnérabilités (projet, système, cycle de vie, environnement) à ces facteurs,
- ❑ à partir des éléments du projet (dont WBS) en analysant leurs menaces et vulnérabilités, ou encore leur défaillances : méthode de type AMDEC (analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité) analogues à celles utilisées en sûreté de fonctionnement,
- ❑ à partir d'un événement redouté : en construisant des diagrammes des causes et effets possibles (voir un exemple Figure 96).

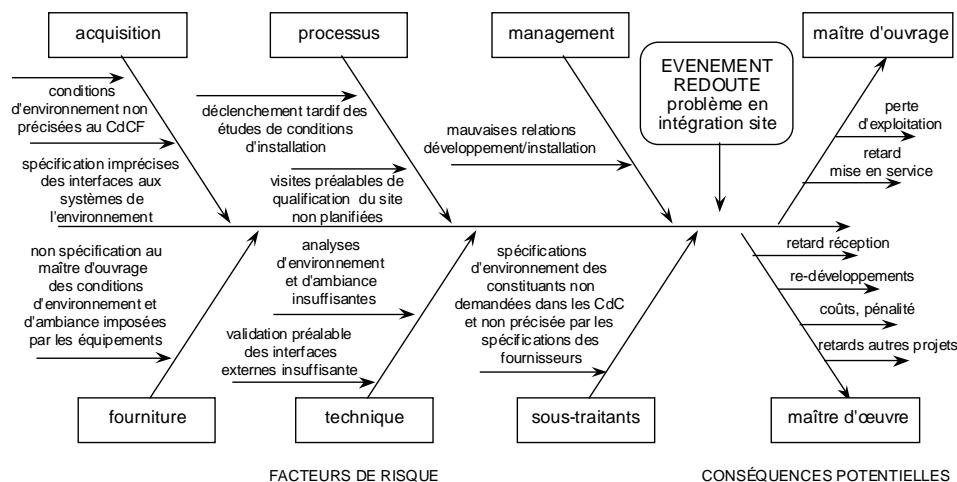


Figure 96 : Exemple de diagramme causes effets

13.4.5 Estimation des risques

Il s'agit ici de quantifier la criticité de chaque risque d'une part en termes de probabilité d'occurrence de l'événement déclencheur du risque et, d'autre part, de gravité ou sévérité de l'impact sur le système ou le projet en cas d'occurrence, en analysant la cascade des conséquences potentielles.

Pour l'estimation de la probabilité d'occurrence, outre l'analyse du réseau de causes, on pourra s'aider des retours d'expérience, chercher un consensus entre plusieurs experts, et quelquefois s'appuyer sur des données statistiques. Pour celle de la gravité de l'impact, on tente de chiffrer en valeur monétaire les effets directs sur les délais et les coûts du projet, ainsi que les effets directs et indirects des non conformités aux objectifs techniques sur la vie du système.

Lorsque l'estimation quantitative est difficile ou sans signification, on note sur une échelle conventionnelle de quelques degrés (par exemple très faible, faible, moyen, fort, très fort pour une échelle graduée de 1 à 5), la

probabilité d'occurrence, et la gravité des conséquences. Le coefficient de criticité du risque est alors le produit des deux notes.

La Figure 97 illustre ce principe. On distingue généralement 3 niveaux de criticité :

- ☐ acceptable,
- ☐ à surveiller et à traiter si nécessaire,
- ☐ inacceptable, à traiter.

On peut éventuellement ajouter un quatrième niveau pour des risques rédhibitoires susceptibles de conduire à l'abandon du projet si des parades sûres ne sont pas trouvées.

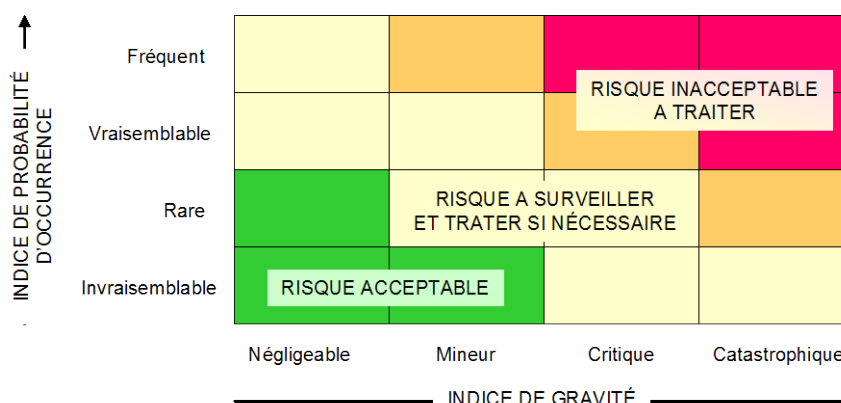


Figure 97 : Criticité des risques

L'estimation d'un risque ne peut être considérée comme définitive car sa probabilité d'occurrence et sa gravité sont susceptibles d'évoluer au cours du projet (il peut dépasser le seuil d'acceptabilité ou changer de classe de priorité de traitement) : un risque doit être surveillé, condition *sine qua non* pour réagir avec la réactivité et l'efficacité nécessaire. Ainsi devra-t-on, pour chaque risque, définir les alarmes et indicateurs pertinents, leurs procédures de collecte et de suivi, les seuils de déclenchement de parades spécifiées ou de lancement de ré-analyse du risque.

13.4.6 Les actions de maîtrise

Les actions de maîtrise agissent en réduction des risques considérés comme étant à traiter en jouant sur leur probabilité d'occurrence ou sur la gravité de leurs conséquences.

On distingue les actions préventives mises en œuvre avant l'arrivée de l'événement redouté, notamment pour le prévenir et les actions de protection et de sauvegarde prévues pour être déclenchées en cas d'arrivée de l'événement.

- ☐ Les actions préventives visent à éliminer ou réduire le risque :
 - en tentant de prévenir l'occurrence :
 - ✓ élimination ou limitation en jouant sur la menace,
 - ✓ esquive par une solution alternative,
 - ✓ diminution de vulnérabilité,
 - ✓ amélioration du seuil de détectabilité.
 - en tentant de prévenir à l'avance ses conséquences :
 - ✓ actions appropriées en annulation ou en limitation des effets potentiels,
 - ✓ partage ou transfert du risque (partenariat, sous-traitance, assurance lorsque l'événement redouté s'apparente à un sinistre).
- ☐ Les actions de protection sont mises en œuvre en cas d'occurrence de l'événement redouté. Elles visent à contenir à un niveau acceptable les conséquences sur la tenue des objectifs du projet :
 - en limitant la gravité des conséquences potentielles,

- en prévenant l'occurrence de situations graves (sinistre, contexte redouté) redoutées à la suite de cet événement.
- ❑ Les actions de sauvegarde sont mises en œuvre lorsque de l'occurrence d'une situation grave mettant en cause de manière inacceptable la tenue des objectifs du projet. Il s'agit alors de chercher à limiter les conséquences ainsi que les phénomènes de propagation ou de cumul de problèmes

Les actions de protection et sauvegarde sont préparées afin d'éviter d'être pris au dépourvu par l'occurrence d'un événement redouté, une situation de crise non préparée conduisant généralement à de mauvaises décisions prises dans la précipitation et le stress. A titre d'exemple, il s'agit de préparer :

- une solution de repli à mettre en œuvre si la solution technique novatrice choisie n'est pas au point à la date limite au-delà de laquelle la solution de repli ne permettrait plus de tenir des objectifs de délais acceptables,
- un scénario de secours (plan de crise) à déclencher lors de l'occurrence d'un sinistre.

La Figure 95 présente les principales données caractérisant une action de maîtrise.

On note que les actions de maîtrise :

- ❑ doivent faire l'objet d'analyse de la valeur : leur coût doit être proportionné à la criticité du risque, par exemple être significativement inférieur au coût des dommages potentiels,
- ❑ doivent être dûment spécifiées et planifiées (plan d'actions en réduction de risques) : on en déduit notamment que tout plan de projet doit provisionner les marges nécessaires (budgétaire, de planning et de ressources) pour permettre de les inclure,
- ❑ doivent comporter les critères de déclenchement à appliquer,
- ❑ doivent comporter leurs objectifs de réduction de risque et donc les risques résiduels prévus ainsi que les risques induits à surveiller et traiter éventuellement,
- ❑ doivent définir les critères de bonne fin et mesures d'efficacité.

13.4.7 Le suivi des risques

Le suivi (surveillance) des risques est un processus continu qui consiste à suivre l'évolution des risques et le déroulement du plan d'actions de maîtrise des risques. C'est notamment un point majeur de toute réunion périodique d'avancement ou de tout reporting des projets.

Le suivi des risques comporte :

- ❑ La surveillance de l'évolution des risques :
 - analyse des symptômes susceptibles d'être annonceurs de nouveaux risques ou d'évolution de risques identifiés (extinction, diminution, aggravation),
 - lancement de la ré-analyse de risques identifiés lorsque l'évolution le justifie ou d'analyse de nouveaux risques détectés,
 - enregistrement systématique du nouveau statut de chaque risque (sous surveillance, estimé, suivi, éliminé).
- ❑ Le suivi du plan d'action en réduction de risques :
 - suivi des indicateurs correspondant aux critères de déclenchement et déclenchement des actions de maîtrise des risques planifiées : événements déclencheurs de réalisation de parades, critères, dont date limite, de commutation sur une solution de repli, conditions de déclenchement d'un scénario de secours,
 - déclenchement et mise en œuvre des actions de maîtrise programmées en fonction des critères de déclenchement (il faut éviter toute tentation de repousser une décision de déclenchement, en espérant que les choses s'arrangeront d'elles-mêmes ce qui ne peut qu'aggraver le risque, par exemple de repousser la commutation sur une solution de repli, sous prétexte qu'à la date ou la

solution novatrice doit être démontrée, son responsable estime qu'elle tombera en marche incessamment),

- suivi des actions de maîtrise des risques, mesures de leur efficacité, surveillance des risques résiduels,
- réactions d'urgence éventuelle aux événements non prévus.

☐ La capitalisation de l'expérience acquise, dont nous avons vu l'importance pour l'analyse des risques d'un nouveau projet :

- retours statistiques de suivi des risques (occurrence effective/probabilité d'occurrence, relations occurrence/facteurs de complexité, etc),
- mémorisation du contexte de décision et de réalisation de chaque action ; analyse de résultat (gain obtenu sur bénéfice escompté, validité des critères de déclenchement),
- mise à jour des données de l'observatoire des risques (check lists, méthodes).

13.5 Méthodes d'évaluation et d'optimisation

Dans le principe, l'IS s'apparente à la recherche d'une solution que l'on aimerait optimale dans un faisceau de contraintes parfois très complexe : la définition des exigences s'apparente à la formalisation des contraintes (système et projet) avec leurs plages de flexibilité et la conception de la solution revient en théorie à un problème d'optimisation sous contrainte de ces exigences.

Les techniques traditionnelles d'optimisation issues de la recherche opérationnelle, qui supposent l'élaboration d'une fonction économique à optimiser (par exemple en minimisant au mieux les écarts permis par les plages de flexibilité des exigences), sont peu applicables, en tout cas au niveau de la solution globale, ne serait-ce que par les aspects de forte discontinuité entre les solutions possibles.

Le processus d'optimisation passe donc plus généralement par l'évaluation et la comparaison de solutions candidates. Comme il n'est pas possible de développer plusieurs solutions dans le détail afin de les évaluer et comparer en toute connaissance de cause, le principe consiste alors à faire les choix successifs, dans un souci d'optimisation systémique en analysant et estimant les impacts du choix sur les différentes branches alternatives. Le processus correspondant est décrit au paragraphe 12.3.2.2 de cette partie.

L'évaluation et la comparaison des solutions se fait généralement, au sens de l'analyse de la valeur, par comparaison de leurs apports ou impacts positifs et négatifs, ce qui se traduit généralement par l'évaluation de rapports de type « efficacité sur coût » de chaque solution à comparer. Sachant que lorsqu'on accroît l'efficacité à coût constant ou que l'on diminue le coût à efficacité constante on augmente mécaniquement les risques tant sur l'obtention de l'efficacité que sur la tenue des coûts, cette comparaison doit être pondérée par les risques : on peut être conduit à préférer une solution moins optimisée que d'autres en termes efficacité sur coût si elle est plus sûre (voir Figure 75). On aura donc à estimer tant l'« efficacité » et le « coût » que les risques des différentes branches alternatives de solutions.

La pertinence nécessaire dans ces opérations d'évaluation est obtenue :

☐ en les plaçant dans un contexte préétabli de vision globale afin de prendre en compte tous les impacts significatifs des solutions :

- modèles de coût prenant en compte l'ensemble de la vie du système, modèle d'efficacité synthétisant et pondérant ses différentes composantes, cohérents avec la finalité du système et la stratégie de l'entreprise,
- approches d'identification et d'estimation des risques adaptés au type de système,
- mise en œuvre organisationnelle de l'aspect multidisciplinaire.

☐ en les limitant au juste nécessaire (l'analyse de la valeur s'applique à l'analyse de la valeur !) :

- recherche des impacts les plus significatifs de chaque solution,
- identification des disciplines réellement concernées,
- focalisation sur les éléments les plus discriminants,

- analyse de sensibilité.

De manière générale, on évolue progressivement d'analyses en largeur, dans les phases amont d'analyse du problème et des premiers choix globaux, à des analyses plus en profondeur mais sur des champs plus limités, dans les phases de fin de conception.

13.5.1 La caractérisation des mérites d'un système

La figure suivante introduit une terminologie permettant de positionner les différentes mesures des "mérites" d'un système.

Les mérites présentés regroupent un ensemble de caractéristiques qui doivent être considérés lors des analyses système et qui permettent de comparer entre elles différentes solutions alternatives pour le système.

Pour simplifier l'exposé nous considérons un système en exploitation, dont les caractéristiques sont donc observables, selon l'illustration donnée par la Figure 98.

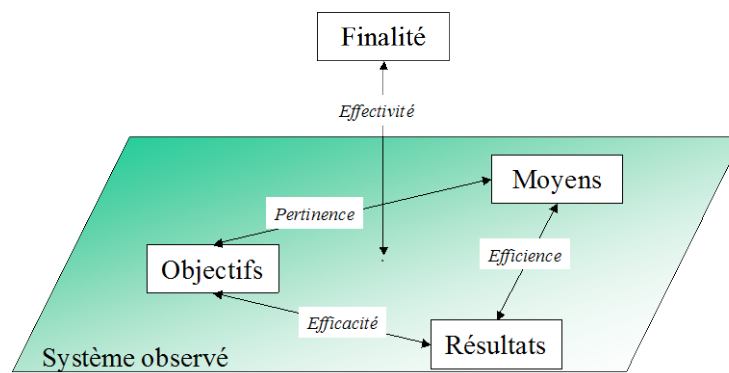


Figure 98 : Les mesures des "mérites" d'un système

L'effectivité du système, caractérise la complétude de l'atteinte de la finalité fixée pour le système (la finalité est-elle atteinte totalement ou partiellement ou en excès ? le système produit-il d'autres résultats que ceux correspondants à sa finalité ?). Pour atteindre une bonne effectivité il faut que la finalité soit définie de façon claire et non ambiguë. La vérification de l'effectivité peut être longue voire peu réaliste pour un système ayant des effets à long terme.

13.5.1.1 Les grandes caractéristiques du système observé

La complétude de l'atteinte de la finalité dépend en particulier des objectifs fixés, par exemple : les objectifs traduisent-ils correctement l'intégralité de la finalité ? L'effectivité du système est donc aussi liée à la qualité du travail effectué par le maître d'ouvrage agissant en tant que prescripteur ou acquéreur.

Le système observé a été réalisé ou acquis pour atteindre des **objectifs** quantitatifs ou qualitatifs, sensés répondre à sa finalité.

Le système en exploitation produit des **résultats**. Les résultats répondent ou non aux objectifs (une usine prévue pour produire 1 000 pièces par an n'en produit que 500 dans les conditions nominales d'opération).

Pour produire ces résultats le système a besoin de **moyens** (ressources humaines, ressources techniques, ressources financières). Les moyens à imputer au système sont ceux qui sont consommés en phase d'exploitation; on peut aussi considérer ceux qui ont été consommés avant la mise en exploitation du système, lors des phases de réalisation ou d'acquisition, et ceux qui seront consommés pour le retrait du service (auxquels devraient s'ajouter les coûts complémentaires d'impacts éventuellement engendrés par l'existence du système ou par ses déchets).

13.5.1.2 L'évaluation des mérites du système

Les mérites du système caractérisent la performance associée aux relations existant entre les trois caractéristiques précédentes (objectifs attendus, résultats obtenus, ressources consommées). Pour le maître d'œuvre responsable de la réalisation du système, le choix de la solution système retenue est fréquemment le résultat d'un compromis entre ces mérites.

On cherche ainsi à mesurer :

- ☐ **L'efficacité** du système : elle traduit le niveau d'atteinte des objectifs fixés. Des compromis ont pu être faits qui ont conduit à ne retenir qu'une partie des objectifs initiaux résultant de la finalité.
- ☐ **L'efficience** du système : elle traduit le niveau de consommation des ressources nécessaire à l'obtention des résultats (y compris les ressources financières). A résultats équivalents une solution système est plus efficiente qu'une autre si elle consomme moins de ressources. Le coût global de possession (ou coût du cycle de vie) est une des composantes de l'efficience.
- ☐ La **pertinence** du système : elle traduit le bien-fondé des solutions adoptées pour définir et réaliser le système. Par exemple une solution basée sur une nouvelle technologie peut être plus pertinente qu'une solution basée sur une ancienne technologie menacée d'obsolescence (sous réserve que le risque dû à la nouveauté soit acceptable).

Le suivi, au cours du cycle de vie, de ces mesures nécessite la mise en place d'indicateurs; des actions correctives peuvent être nécessaires si les niveaux atteints sont jugés insuffisants.

13.5.2 Estimation des coûts

Dans une approche globale, le modèle de coût à prendre en compte pour les comparaisons est à l'évidence, au moins pour un système unique, le coût de cycle de vie (ou coût global de possession selon le point de vue du maître d'ouvrage). Dans le cas des produits à commercialiser, les composantes du coût peuvent être pondérées en fonction de la stratégie d'entreprise, en notant que certains coûts peuvent générer des gains par ailleurs : lignes de produits, recyclage..

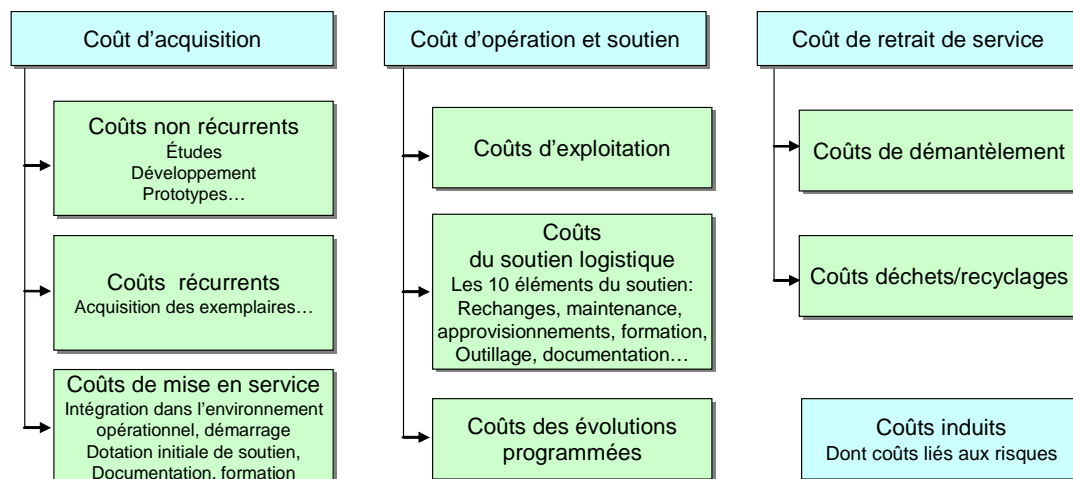


Figure 99 : Les éléments du coût de cycle de vie

A titre d'exemple, la Figure 99 représente les différentes composantes du coût de cycle de vie d'un système, vu du maître d'ouvrage, susceptibles d'être prises en compte (dans la mesure où elles sont discriminantes pour la comparaison envisagée).

On dispose généralement de modèles d'évaluation des coûts de développement reliés à des dimensions significatives exprimant la complexité des éléments du système (nombre de portes d'un circuit logique pour

prendre un exemple très élémentaire) ou de retours d'expérience permettant des estimations, et donc des comparaisons de coûts d'acquisition, dès les premières phases d'ingénierie.

Pour ce qui concerne la phase de vie opérationnelle du système, un modèle économique tenant compte des perspectives d'emploi pour un maître d'ouvrage opérateur du système ou des choix industriels et commerciaux pour un maître d'ouvrage appelé à commercialiser le produit est indispensable pour servir de référence aux études comparatives. Le cas des systèmes ou produits orientés service en fournit un exemple typique. Par exemple, un téléphone portable offre aujourd'hui de nombreux services issus de systèmes et opérateurs différents : les contextes de financement, de promotion et de commercialisation de ces services et produits peuvent avoir des impacts significatifs sur les choix d'ingénierie.

13.5.3 Estimation de l'efficacité

L'efficacité (terme général qui regroupe les différents mérites d'un système, à l'efficacité près qui est incluse dans l'aspect coûts) est plus difficile à évaluer que les coûts, ne serait-ce que par la multiplicité de ses facettes et l'absence d'unité de mesure commune. On s'appuie sur un modèle d'évaluation d'efficacité fournissant, pour chaque facette d'efficacité, une formule reliant l'efficacité du système à une combinaison pondérée de quelques performances ou attributs techniques.

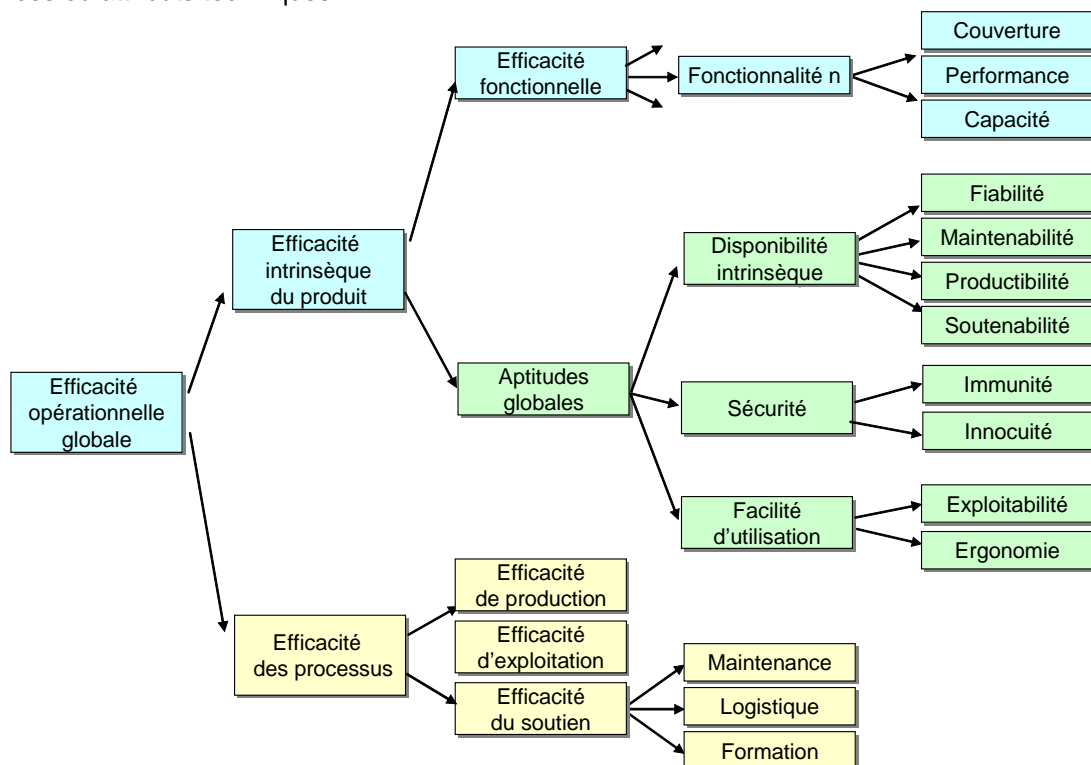


Figure 100 : Exemple d'arborescence des composantes de l'efficacité d'un produit technique

Ce modèle comporte généralement :

- ❑ une arborescence des composantes de l'efficacité adaptée au type de système. La Figure 100 en propose un exemple type pour un système technique. Ainsi la composante « immunité » peut-elle avoir les facettes telles que la capacité de résistance aux effets d'ambiances (rayonnement, température, hygrométrie, choc, vibration...) et aux agressions accidentelles ou intentionnelles (sinistres, sabotage, intrusion dans les systèmes informatiques...),
- ❑ une échelle d'évaluation commune à l'ensemble des facettes (par exemple une notation sur une échelle de 1 à 5) et des métriques d'évaluation propres à chaque facette lorsque l'efficacité correspondante n'est pas directement mesurable,

- ❑ un système de pondération accordant des poids relatifs aux différentes composantes et facettes de l'efficacité (souvent obtenu par classement en comparant successivement les composantes deux à deux : la sûreté est-elle plus ou moins importante que la performance fonctionnelle ?).

Remarque : dans le modèle d'efficacité de la Figure 100, l'efficacité de la partie organisationnelle est évaluée sur les processus (production, exploitation et soutien), ce que généralement peut définir l'ingénierie système, par exemple pour un système réalisé pour différents clients ayant chacun leurs propres organisations d'exploitation et soutien. Eventuellement d'autres éléments (type d'organisation, compétences...) peuvent intervenir s'ils peuvent être connus et estimés.

Le modèle est susceptible d'évoluer au cours de la conception soit pour traduire une évolution de la stratégie, soit pour s'adapter aux problématiques de choix : passage de modèles très globaux pour les choix initiaux à des modèles de plus en plus détaillés lorsque l'on arrive à la conception physique.

Dans chaque étude de choix, on se focalise sur les facettes d'efficacité les plus significatives pour l'étude en cours et les plus discriminantes pour la comparaison.

13.5.4 Estimation et prise en compte des risques

Il s'agit :

- d'identifier les risques majeurs associés aux solutions candidates, et d'éliminer les solutions présentant des risques inacceptables,
- d'identifier et d'estimer les risques discriminants entre les solutions candidates restantes,
- de prendre en compte ces estimations dans la comparaison des solutions.

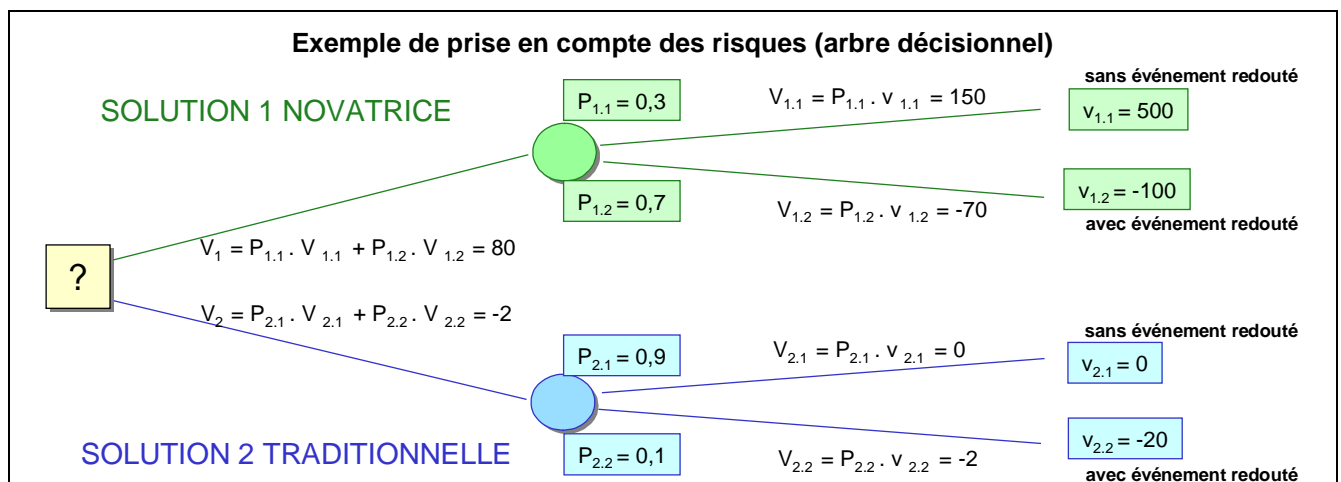


Figure 101 : Comparaison de solutions valorisées prenant en compte les risques

La Figure 101 illustre la manière dont les risques peuvent être pris en compte dans la comparaison des solutions. L'arbre de décision représenté compare une solution novatrice risquée susceptible de faire gagner 500 par rapport à une solution traditionnelle beaucoup moins risquée, de valeur nominale 0.

La solution novatrice présente un risque de 70% de ne pas gagner 500, mais de perdre 100, qui ramène à 80 sa valeur obtenue par la somme des produits (probabilité x valeur) des branches de l'alternatives. La solution plus traditionnelle présente un petit risque de 10% qui ramène, par le même principe de calcul, sa valeur à -2.

La solution novatrice devrait être préférée au vu des résultats (80 versus -2). La proposition de décision devrait comporter une étude sérieuse des parades en réduction du risque de probabilité 0,7.

Après avoir identifié les risques inacceptables susceptibles d'éliminer une solution, on se focalise sur les risques significatifs spécifiques à chacune des solutions restantes (c'est-à-dire sur ceux susceptibles d'avoir un caractère discriminant dans le contexte de la comparaison). Qu'il s'agisse de risques sur la tenue des exigences système au long de la vie du système (risques système), ou sur celle de la tenue des objectifs du projet (risques projet), ils ont tous des conséquences potentielles sur l'un des deux termes du rapport de comparaison, efficacité et/ou coût, et, après estimation, peuvent être *in fine* évalués en termes de coût.

L'estimation d'un risque consiste à estimer sa probabilité d'occurrence et le coût de ses conséquences en cas d'apparition, la criticité du risque étant définie comme le produit des deux. En cas de criticité élevée ou de coût rédhibitoire de faible probabilité, on cherche des parades. L'estimation tient alors compte du coût des parades retenues et de l'estimation des risques résiduels.

13.6 Méthodes en sûreté de fonctionnement des systèmes

La sûreté de fonctionnement et la sécurité représentent un défi majeur de l'ingénierie système :

- ☐ les risques humains, écologiques, économiques dus aux défaillances des systèmes croissent avec la complexité de ces systèmes,
- ☐ la sensibilité en matière d'acceptabilité des risques a fortement évoluée et l'accident devient de moins en moins acceptable dans de nombreux domaines,
- ☐ l'importance prise par les systèmes dans toutes les activités humaines rend de plus en plus insupportables les effets de leurs indisponibilités,
- ☐ l'interopérabilité affaiblit mécaniquement la sûreté globale des systèmes de systèmes,
- ☐ l'environnement de nos systèmes croît en complexité et en imprévisibilité. Les aspects humains y deviennent prépondérants : l'humain, en tant qu'individu (facteur humain) ou en tant qu'organisation (facteurs organisationnels, culturels..), est de plus en plus inclus dans la boucle, tandis que le milieu humain complexe qui forme l'environnement de beaucoup de systèmes présente de multiples formes d'agressivité, dont la malveillance, qui doivent être prises en compte.

L'ancienne approche de recherche de fiabilité des systèmes technologiques a fait place à des approches beaucoup plus globales de sûreté de fonctionnement (SdF) et de sécurité.

La sûreté de fonctionnement vise à ce que le système puisse conserver dans le temps ses propriétés essentielles de bon fonctionnement et sécurité (qu'il reste conforme à ses exigences de sécurité, fiabilité, disponibilité, etc.). Elle s'intéresse donc à ce qui s'oppose à cet objectif et apparaît comme une discipline des défaillances. Elle est fondée sur une approche d'analyse **dysfonctionnelle**, à l'évidence complémentaire de l'analyse fonctionnelle à la base de la conception des systèmes.

Les origines de manquement à la sûreté de fonctionnement peuvent provenir du système lui-même (dysfonctionnement, panne), de ses systèmes contributeurs, notamment d'exploitation et de soutien opérationnel (erreurs dans l'application des procédures d'exploitation ou de maintenance), mais aussi de comportements anormaux ou agressifs de l'environnement susceptibles de mettre en cause l'intégrité du système ou d'entraîner son dysfonctionnement.

On est ainsi arrivé à la notion de **système résilient**. La résilience se définit comme la capacité d'un système dans son environnement à assurer ses missions à un niveau acceptable et sûr en maîtrisant/s'adaptant à des situations/événements prévus et/ou non prévus.

C'est à la fois le caractère impératif et l'aspect systémique de la SdF et de la résilience des systèmes qui nous conduisent à les prendre comme exemple de spécialité, dans cette approche des méthodes de l'IS.

Ce chapitre se limite à donner un aperçu de la problématique et quelques éléments méthodologiques, sachant qu'aujourd'hui, chaque domaine de la SdF devient un métier à part entière.

La SdF au coeur de l'IS

Cet aspect d'ultra spécialisation des différentes facettes de la SdF des systèmes a son revers : elle risque de conduire à faire de la SdF une activité de spécialistes à part, venant en fin de projet pour sécuriser le système une fois conçu, en analysant les risques de dysfonctionnement ou d'atteinte à la sécurité et en leur trouvant des parades.

Mais on ne sécurise pas un système *a posteriori* en le dotant de quelques défenses, on conçoit un système de telle sorte qu'il **garantisse par conception les propriétés de sûreté et sécurité exigées**. Autant, sinon plus, que tout autre spécialité, la SdF doit être intimement intégrée à l'ingénierie système tout au long du projet.

De même, le problème ne s'arrête pas à la livraison du système : la maîtrise des risques système (notamment la recherche de résilience) perdure tout au long de la vie opérationnelle du système : analyse des incidents d'exploitation, suivi de l'efficacité des mesures mises en place, détection de nouveaux risques, suivi des évolutions des missions et des environnements, etc.

Ce chapitre se propose :

- ❑ De partir de la problématique de maîtrise des risques systèmes appliquée au problème de sécurité des systèmes. La maîtrise des risques ayant été traités au chapitre 13.4, nous nous contentons d'adapter les définitions pour ce contexte particulier et d'ajouter quelques commentaires (voir Figure 102, gauche).
- ❑ D'aborder les aspects techniques de la SdF (voir Figure 102) :
 - les objectifs et les composantes de la SdF,
 - les défaillances et leurs origines (chaîne des erreurs),
 - les techniques de la sûreté de fonctionnement.
- ❑ De présenter succinctement les processus et activités :
 - Dans le contexte de l'ingénierie système pour concevoir des systèmes sûrs de fonctionnement
 - Dans le contexte de l'exploitation pour garantir la maîtrise des risques système

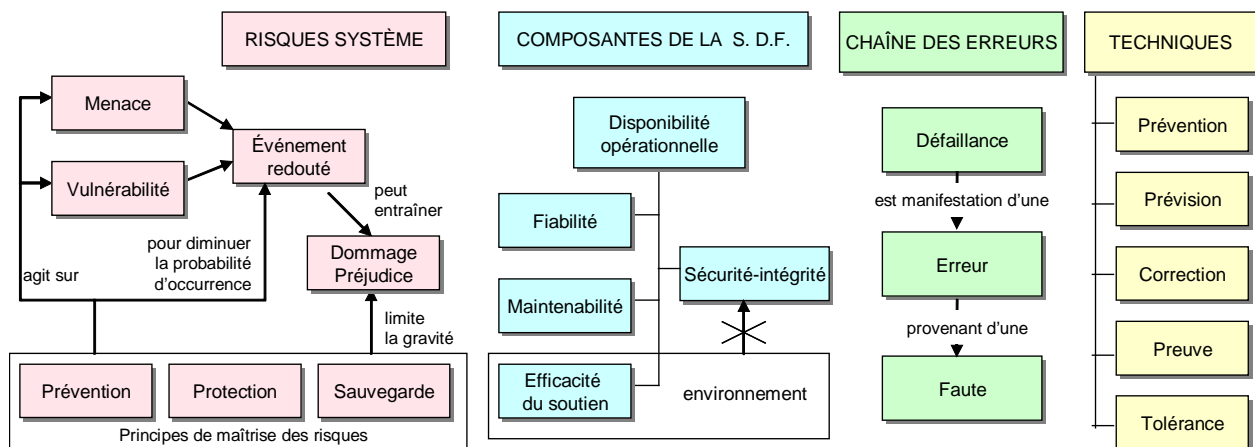


Figure 102 : Principaux concepts de la SdF

13.6.1 Problématique de maîtrise des risques appliquée au système en exploitation

La sûreté de fonctionnement peut être approchée par la maîtrise des risques de ne pas respecter les objectifs de sécurité, fiabilité, disponibilité alors que ce non respect peut être à l'origine de dommages ou de préjudice inacceptables.

On appelle **événement redouté** un événement dont l'apparition conduit à ne plus respecter les objectifs qui sont potentiellement source de dommages inacceptables.

On appelle **contexte redouté** une situation qui conduit à au moins un effet final non souhaité (un accident par exemple).

Un événement redouté provient de l'exploitation d'une vulnérabilité par une menace (on utilise quelquefois le terme d'agression ou attaque).

Une **menace** (danger, péril) se définit de manière générale comme ce qui est (élément, propriété d'une substance, phénomène, situation) susceptible de conduire à des dommages pour les personnes, les biens ou l'environnement, ou encore comme potentiel de dommage ou préjudice portant atteinte aux personnes, aux biens ou à l'environnement.

La **vulnérabilité** caractérise la sensibilité d'un élément sensible à une menace

Un **risque** est la mesure associée à un événement redouté définie par la combinaison de la probabilité d'occurrence ou de survenance (fréquence) de l'événement et la gravité de ses conséquences.

La **réduction des risques** peut porter sur

- ☐ la probabilité d'occurrence, en tentant d'agir sur les menaces (recherche d'innocuité), quand c'est possible, et/ou sur les vulnérabilités (recherche d'immunité),
- ☐ la gravité des conséquences.

La réduction des risques repose, pour tout couple {agresseur/agressé} ou {menace/vulnérabilité} sur trois principes :

- ☐ **Principe de prévention** : permet de limiter fortement l'apparition de l'événement redouté qui pourrait conduire à un effet final inacceptable sur l'élément sensible. Il agit sur l'occurrence de l'événement redouté.
- ☐ **Principe de protection** : lorsque l'événement redouté survient, il maintient l'effet final dans des limites acceptables. Il agit sur la gravité des effets potentiels et sur l'occurrence du contexte redouté.
- ☐ **Principe de sauvegarde** : il limite les conséquences ou l'ampleur des effets finaux en cas de dépassement des valeurs acceptables. Il agit sur la gravité de l'effet final et la non-combinaison avec d'autres effets finaux.

Ces principes peuvent être activés en permanence ou s'activer à la détection d'une situation particulière (élément pouvant conduire à l'événement redouté, apparition de l'événement redouté ou du contexte redouté) ou d'une défaillance d'un principe.

Pour chaque principe on peut adopter différents modes d'action : en agissant sur l'élément agresseur, en agissant sur le flux agressifs (recherche d'innocuité) ou en agissant sur l'élément sensible (recherche d'immunité). Les moyens à mettre en œuvre pour les réaliser peuvent être externes ou internes au système, purement techniques (automatisme) ou purement de type organisationnel (procédures à appliquer) ou encore mixte (à la fois technique et organisationnel : alarme technique traité par une procédure).

13.6.2 Objectifs et composantes de la sûreté de fonctionnement :

La sûreté de fonctionnement (SdF) au sens strict, objet principal de ce chapitre, a pour objectif de répondre aux exigences de disponibilité opérationnelle, c'est à dire :

- ☐ D'abord aux exigences de **fiabilité** du système particulièrement contraignantes dans les systèmes critiques (transport aérien, nucléaire...) souvent soumis à certification, ou dans les systèmes non accessibles à la maintenance (système en mission, système en milieu hostile). La fiabilité est définie comme l'aptitude du système à remplir les fonctions requises sans défaillance pendant une durée donnée, dans des conditions données. Elle se mesure par le temps moyen de bon fonctionnement jusqu'à défaillance.

- ❑ Ensuite aux exigences de **disponibilité** répondant à des attentes de continuité de service généralement sous-tendues par des impératifs économiques. La disponibilité est définie comme l'aptitude du système à remplir les fonctions requises à un instant donné. Elle se mesure par le pourcentage de temps de bon fonctionnement (donc de disponibilité) du système, les indisponibilités correspondant aux temps entre défaillance et remise en condition opérationnelle (ainsi qu'aux temps d'arrêt imposés par le soutien : ravitaillement, maintenance préventive).

Elle dépend donc de la fiabilité et de la **maintenabilité** (qui sont des propriétés intrinsèques de système principal) mais aussi de la réactivité et l'efficacité du système de soutien chargé du maintien en condition opérationnelle. La maintenabilité est définie comme l'aptitude du système à être maintenu ou rétabli en état d'accomplir les fonctions requises en appliquant les règles de maintenance prescrites.

Une condition nécessaire de la sûreté de fonctionnement est évidemment que le système conserve son **intégrité** face aux agressions de l'environnement. A l'inverse, le système doit avoir un comportement qui ne porte pas atteinte à l'environnement, voir qui préserve l'environnement de certaines de ses propres agressions. Ceci conduit à deux approches de la sécurité que par analogie avec la biologie nous proposons de nommer sécurité-immunité et sécurité-innocuité, bien que ces termes soient peu usités dans le domaine de l'ingénierie. On considère ainsi :

- ❑ l'**immunité** du système : il se protège face aux agressions de l'environnement telles qu'ambiances agressives, concrétisation de menaces issues de l'environnement menaces physiques (ambiances, sinistres), menaces humaines accidentelles ou intentionnelles. Le système doit se défendre face à ces agressions pour garantir son **intégrité** condition nécessaire pour pouvoir assurer sa mission.

Un exemple de sécurité-immunité est donné par la sécurité, tant physique que logique, des systèmes d'information avec les trois critères de disponibilité (les fonctionnalités du système doivent être disponibles aux ayants droit quand ils en ont besoin), d'intégrité (les éléments du système ne peuvent être modifiés que par les ayants droit selon les procédures autorisées) et de confidentialité (l'information n'est accessible qu'aux seuls ayants droit).

- ❑ l'**innocuité** du système : il évite de porter atteinte à son environnement (sécurité des personnes et des biens, sécurité écologique...). Cet aspect est étudié et fait l'objet de prévention dès les études d'impacts potentiels directs ou indirects du système sur son environnement pendant tout le cycle de vie du système (et aussi de celui de ses déchets par la suite). En exploitation, il résulte d'une part d'une bonne définition des exigences fonctionnelles (ce que le système doit faire pour servir et protéger son environnement en tenant compte des anomalies potentielles de comportement de ce dernier ou des erreurs d'exploitation) et des procédures d'exploitation associées, d'autre part d'un fonctionnement et d'une exploitation sûrs et conformes aux exigences.

Vue sous ces différents aspects, la sûreté de fonctionnement nécessite une approche système :

- ❑ approche systémique des menaces. Les cindyniques, sciences du danger, qui offrent des approches systémiques d'analyse des dangers en milieu complexe, peuvent être utilisées tant en recherche des dangers potentiels qu'en retour d'expérience après accidents,
- ❑ approche systémique des vulnérabilités de l'ensemble des éléments du système, de ses organisations d'exploitation et de soutien : il s'agit de ne pas laisser de maillons faibles,
- ❑ Analyse de tout couple menace/vulnérabilité (agresseur/agressé) potentiel.

13.6.3 La chaîne des entraves à la sûreté de fonctionnement

Sur un système en fonctionnement, on peut constater des **défaillances** (dysfonctionnements, pannes, ...).

Une **défaillance** (*failure*) correspondant à l'altération ou la cessation de la capacité d'une entité fonctionnelle à assurer une fonctionnalité requise. Elle est la manifestation d'une anomalie de fonctionnement qui s'est propagée jusqu'à la frontière du système.

Sa cause est une **erreur** (*default*) affectant l'état d'une partie du système (un défaut dans cette partie du système).

La cause d'une erreur est une **faute** (*fault*).

Par exemple un court-circuit sur un composant, une perturbation électromagnétique, une faute de développement, un défaut de fabrication sont considérées comme des fautes qui peuvent entraîner une erreur dans une partie du système qui, si elle est activée, peut conduire à constater une défaillance de cette partie.

Exemple : une faute de programmation entraîne un défaut dans un programme. La défaillance peut intervenir si ce le défaut est activé lors de l'utilisation du programme ainsi erroné,

Cet ensemble de définition est récursif : dans l'arborescence de décomposition du système, la défaillance d'un constituant apparaît comme une faute pour le constituant de niveau supérieur

On appelle **panne** l'inaptitude d'une entité à accomplir une mission sans défaillance.

On appelle **mode de défaillance** l'effet par lequel une défaillance est observée.

On distingue deux types de défaillances :

- ☐ les défaillances aléatoires dont on cherche à limiter la fréquence d'occurrence (par exemple par la maintenance préventive et le remplacement systématique des pièces d'usure).
- ☐ les défaillances systématiques résultant par exemple d'une erreur de conception que l'on cherche à éviter par la qualité des processus (par exemple des processus de conception et de V & V pour les erreurs de conception),

Les fautes peuvent ainsi avoir leur origine dans une mauvaise application, voire dans une définition insuffisante ou inadéquate d'un processus :

- ☐ de conception (défaut de conception, dont défaut de protection du système face aux dysfonctionnements accidentels ou intentionnels de l'environnement),
- ☐ de production (défaut de fabrication),
- ☐ de maintenance (rechange de pièce d'usure non effectuée en temps utile ou selon les procédures en vigueur),
- ☐ de documentation ou de formation des opérateurs d'exploitation ou de maintenance (pouvant conduire à une mauvaise manipulation).

Lors de l'occurrence d'une défaillance, en phases d'essai comme en phase d'exploitation, il est évidemment nécessaire de diagnostiquer l'erreur cause de la défaillance pour **la corriger** (réparation).

Il est également important de remonter aux causes originelles de l'erreur diagnostiquée pour **se corriger** (amélioration des processus et de leur mise en pratique pour ne plus introduire le même type d'erreur dans les systèmes) ou encore mettre en évidence des failles dans les processus de V&V ou de maintenance préventive qui ne l'ont pas détectée. La reconnaissance de l'erreur humaine doit être valorisée : ne pas considérer l'erreur comme une faute, mais comme un facteur de progrès.

En phase de conception, l'**analyse dysfonctionnelle** se fonde sur cette chaîne de cause à effet (faute → erreur → défaillance) pour analyser les conséquences globales dues à la propagation d'anomalies locales potentielles ou, inversement, les origines possibles de dysfonctionnements globaux redoutés.

13.6.4 Les techniques de la sûreté de fonctionnement

De manière générale, les approches méthodologiques et les techniques mises en œuvre en sûreté de fonctionnement consistent :

- à prévoir et évaluer les défaillances possibles,
- à prévenir les causes des défaillances,
- à corriger les défauts causes des défaillances,
- à tolérer les défauts en assurant la mission malgré les défaillances,
- à prouver la sûreté de fonctionnement.

La sûreté de fonctionnement est une des composantes de la définition du système, elle intervient donc tout au long de la conception dans la recherche d'une solution optimisée, puisant au mieux dans ces différents moyens méthodologiques, en proportionnant les moyens mis en œuvre tout au long de la vie du système à la criticité (probabilité d'occurrence x gravité des conséquences) des risques de défaillances.

Les paragraphes suivants présentent quelques moyens méthodologiques classiquement mis en œuvre pour y parvenir.

13.6.4.1 La prévision des dysfonctionnements

Il s'agit, d'une part, d'identifier les différents types de causes possibles susceptibles de conduire à défaillance (afin d'y remédier dans la mesure du possible) et, d'autre part, d'estimer la fiabilité (en fonction de la fiabilité des constituants et des défauts résiduels) :

□ Analyses et modélisations dysfonctionnelles :

- recherche des scénarios conduisant aux défaillances et des causes insidieuses,
- analyse des conséquences de défaillances de fonctions ou d'organes sur le comportement du système (AMDEC : analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité),
- à l'inverse, recherche des causes potentielles de dysfonctionnements redoutés (arbre de défaillances),
- analyses ergonomiques des causes et effets des erreurs humaines,
- analyse conjointe des menaces de l'environnement, des vulnérabilités du système et des conséquences d'agressions. Analyse des risques d'atteinte à l'immunité du système,
- analyse des risques que le système est susceptible de faire courir à son environnement tant en fonctionnement nominal qu'en dysfonctionnement. Etude des causes susceptibles de porter atteinte à l'innocuité du système.

□ Estimations de fiabilité prévisionnelle :

- calculs probabilistes ou stochastiques de fiabilité des matériels à partir des tables et courbes d'évolution de fiabilité des composants : courbes d'usure des pièces mécaniques, tables de fiabilité des composants électroniques dans le plat de la courbe en baignoire (après défauts de jeunesse et avant effets de vieillissement...),
- utilisation de modèles d'évolution de maturité des logiciels (et composants logiques complexes) : courbes de décroissance de détection de nouveaux défauts au cours du temps permettant d'estimer asymptotiquement le nombre de défauts résiduels.

13.6.4.2 La prévention des défauts

Il s'agit de prévenir les dysfonctionnements soit en évitant l'introduction de défauts en conception ou en production, soit en évitant les pannes dues à l'usure via la maintenance préventive (échange systématique des pièces d'usures, réparation ou rechange de composants ayant montré des faiblesses ou des dysfonctionnements aléatoires...), soit encore en évitant l'apparition de défauts en utilisation (exemple : formation des opérateurs, information des usagers).

La SdF est, à l'évidence, améliorée par une bonne application des processus d'IS, tant en développement qu'en production exploitation et soutien, et tout particulièrement de leurs sous-processus de V&V ou de contrôle qualité, ceci dans le contexte d'une prise en compte raisonnable des conséquences de l'analyse dysfonctionnelle et des estimations de fiabilités sur le système et les processus contributeurs.

13.6.4.3 L'élimination des défauts

Il s'agit de l'ensemble des méthodes et techniques utilisées en V&V lors de la conception, en contrôle de fabrication, en suivi d'exploitation et en maintenance pour tenter de détecter et corriger les défauts de conception, de fabrication ou dus à l'usage dont l'usure.

Il n'est pas de notre propos de traiter des méthodes de revues, tests et essais, contrôles de toutes sortes, mais seulement de rappeler leurs limites, notamment dans les aspects systémiques généralement traités par le logiciel. A partir d'un certain degré, même relativement faible, de complexité, le test exhaustif est impossible du fait de la combinatoire des parcours possibles dans l'espace des états des systèmes, de la combinatoire des données ... On peut tout au plus estimer des degrés de couvertures atteints, mais en aucun cas garantir l'absence de défaut dans un grand logiciel du seul fait des tests. On recherche alors des approches fonctionnelles donnant des garanties suffisantes pour s'en passer ou, quand c'est raisonnable, des preuves formelles.

Le test des dispositifs propres aux mécanismes de sûreté de fonctionnement et de sécurité, notamment ceux qui ne sont pas mis à contribution en fonctionnement normal, doivent faire l'objet d'une attention toute particulière tant en V & V qu'en maintenance.

13.6.4.4 La tolérance aux défauts et aux pannes

Il s'agit de garantir le niveau de fiabilité, de disponibilité et de sécurité requis pour le système ou pour ses fonctions les plus critiques, malgré des risques de défaillances. En voici quelques approches :

- ☐ Tolérance aux défauts et pannes d'équipements
 - redondances pour masquer les défaillances aléatoires ou systématiques (redondance matérielle et vote majoritaire, programmation N versions) ou reprendre en secours les fonctions d'un sous-système défaillant (auto-détection et reconfiguration),
 - modes dégradés permettant de poursuivre les objectifs les plus fondamentaux de la mission,
 - couches logicielles défensives de détection d'erreur dues aux défauts du logiciel avec récupération de l'état grâce aux redondances, ou, à défaut, remise en configuration exempte d'erreurs, ou, à défaut, arrêt de sécurité des fonctions défaillantes (passage en mode dégradé) ; au-delà, si nécessaire mais ce n'est plus de la tolérance, procédures d'arrêt de sécurité du système, etc.
- ☐ Tolérance du système technique aux fautes d'inattention et de fatigue des opérateurs, rattrapage d'erreurs du système technique par le bon sens, la capacité de synthèse et la réactivité des opérateurs.
- ☐ Ajoutons en corollaire l'enregistrement systématique des anomalies constatées et autres faits techniques en vue de maintenance préventive, de retours d'expériences et d'améliorations, voir d'analyse après accident (boîte noire de l'aéronautique).

13.6.4.5 Les démonstrations d'obtention de la sûreté

Il s'agit de fournir les éléments de preuve donnant une confiance suffisante dans la sûreté de fonctionnement du système pour une prise de décision (le mettre en exploitation, le certifier ou l'homologuer...).

- ☐ Définition et mise en œuvre d'une stratégie efficace et réaliste de démonstrations apportant les preuves ou les niveaux de confiance exigés en validant leur représentativité et leur couverture : par exemple,
 - mise en œuvre de plans d'expériences et d'essais,
 - analyse de données d'expériences,
 - simulations ou essais au-delà des limites exigées pour l'utilisation,
 - essais destructifs sur prototypes pour tester les limites de robustesse, etc.
- ☐ Preuves formelles de comportement conforme du système (logiciel, circuits logiques complexes) :
 - spécification formelle de comportement du système dans les différents scénarios normaux et anormaux d'utilisation (utilisation de réseaux de Petri, de logiques temporelles...),
 - spécification formelle des mécanismes de tolérance aux pannes et de sécurité,
 - construction de logiciel par transformations successives prouvées à partir d'une spécification formelle (exemple : méthode B).

13.6.5 Les activités de SdF dans le processus d'IS

Rappelons d'abord que la qualité des processus d'IS est une condition nécessaire de la sûreté de fonctionnement : pas de sûreté/sécurité (du système) sans qualité (des processus).

Dans ce contexte, la démarche d'obtention du niveau de sûreté de fonctionnement exigé doit être totalement intégrée aux processus d'IS :

- ☐ L'obtention des objectifs de sécurité, de fiabilité et de disponibilité à respecter impliquent la présence d'un certain nombre de fonctions supplémentaires en réduction des risques de ne pas les atteindre.
- ☐ Ces fonctions doivent elles-mêmes respecter un certain niveau de sécurité fonction de leur contribution aux réductions de risques,

Ceci rejailit directement :

- ☐ sur toutes les phases de la conception pour analyser les entraves potentielles à la sécurité et définir les exigences de sécurité, les fonctions de sécurité, les architectures sécuritaires et in fine sur le système et son architecture.
- ☐ sur les processus à mettre en place en termes d'organisation (indépendance des équipes par exemple), de compétence du personnel ainsi que de méthodes et d'outils pour faciliter la conception (évitement d'erreur), la vérification et la validation (détection des erreurs) et l'optimisation (arbitrage gains/risques).

Tout au long du processus de conception/réalisation sont effectués des analyses de risques adaptées à chacune des étapes, d'abord au niveau du système, puis au niveau des sous-systèmes, jusqu'au niveau des équipements.

Ces analyses sont faites vis-à-vis de l'environnement, des principes technologiques retenues, des fonctions de conception rajoutées (association de principes, regroupement de fonctions d'un même mode ou de modes différents, adaptation entre éléments), des architectures fonctionnelle et physiques et enfin des défaillances fonctionnelles et physiques

Ces analyses de sécurité permettent d'explicitier des exigences qui devront être respectées dans la partie aval du processus. La Figure 103 montre la décomposition des exigences de sécurité en exigences fonctionnelles de sécurité (ce que le système doit faire du point de vue sécuritaire pour ou face à son environnement) et en exigences d'intégrité face aux défaillances pour s'affranchir tant des dysfonctionnements aléatoires que des dysfonctionnements systématiques.

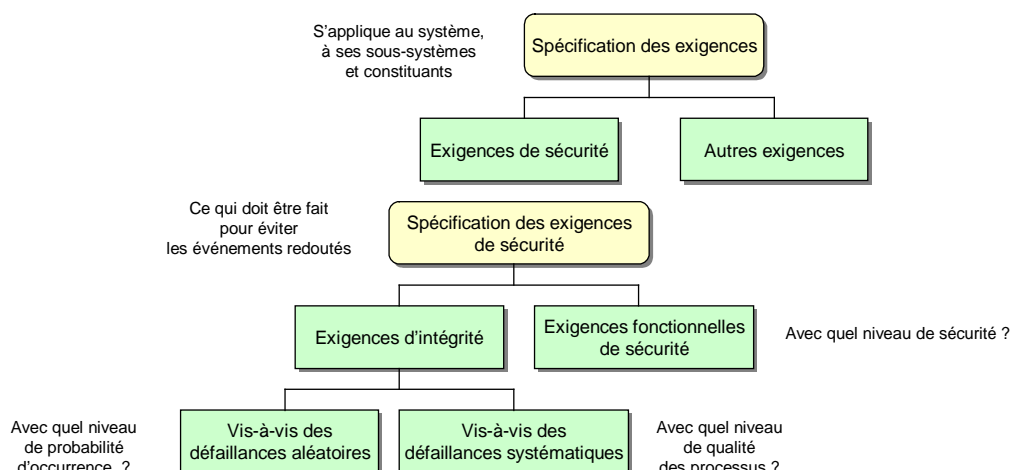


Figure 103 : Les exigences de sécurité

Les principes d'application en sont les suivants :

- ❑ *Etudes amont* : analyse préliminaire des risques associés à l'exploration des concepts d'opération permettant de positionner le système en termes de classe de sécurité et de sûreté de fonctionnement.
- ❑ *Analyse des besoins et spécification des exigences*. Identification et analyse des entraves à la sûreté de fonctionnement ainsi que des menaces et des vulnérabilités réciproques du système et de l'environnement : spécification des exigences de sûreté et sécurité correspondantes.
- ❑ *Conception*. Guidage de la conception du système et de la définition de ses concepts de maintenance par la prise en compte des exigences de sûreté et sécurité qui sont allouées aux fonctions puis aux constituants. On en déduit, d'une part, les spécifications des fonctions et mécanismes de sûreté et sécurité ainsi que des éléments de maintenabilité et, d'autre part, la définition des procédures d'exploitation et de maintenance visant à garantir la sécurité et la sûreté de fonctionnement.
- ❑ *IVVQ*. Démonstration de l'atteinte d'un degré de sûreté de fonctionnement et de sécurité conforme aux exigences. Validation des procédures d'exploitation et de maintenance.

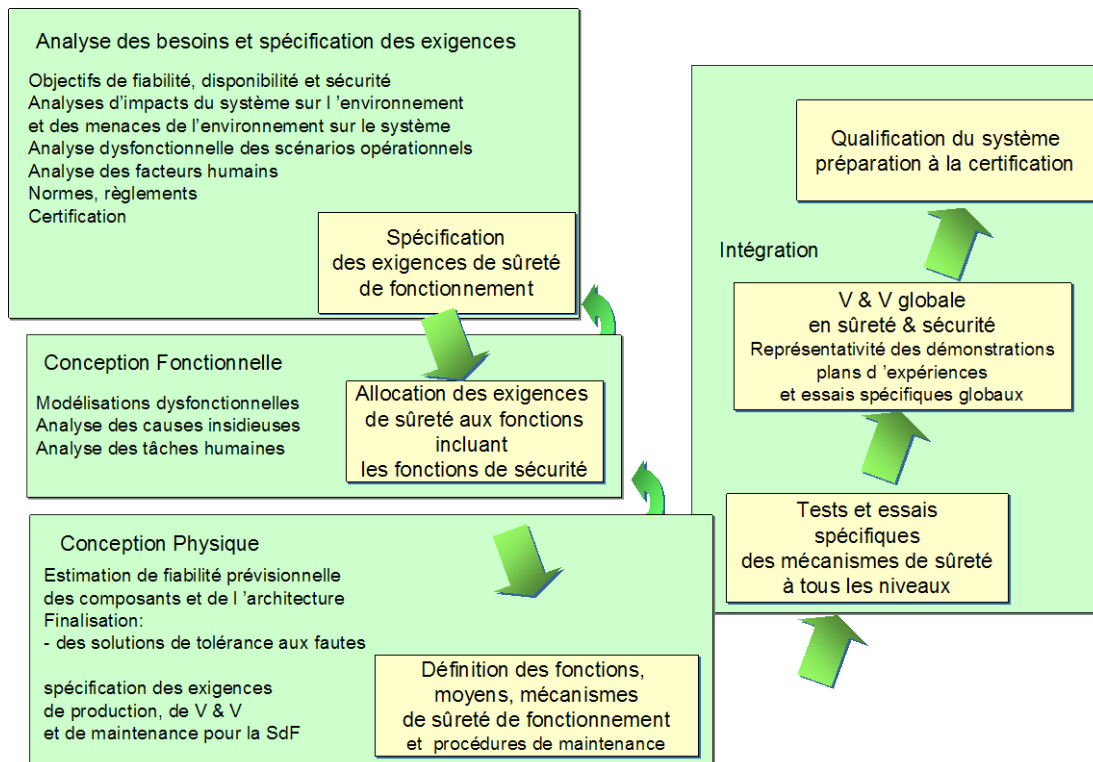


Figure 104 : La démarche de sûreté de fonctionnement

La Figure 104 montre synthétiquement l'intégration des activités propres à la SdF et à la sécurité dans les processus techniques d'IS, en indiquant, à titre d'exemple, quelques techniques mises en œuvre.

13.6.6 La maîtrise des risques système en exploitation

L'exploitation du système est soumise à des dangers internes ou externes susceptibles d'avoir des conséquences graves pour l'environnement du système : risques humains, économiques, sociaux, écologiques, etc.

Après la mise en service opérationnelle du système, le management des risques système reste une préoccupation majeure de l'exploitant, d'autant plus prégnante que la criticité est plus élevée (transport aérien et ferroviaire, installations nucléaires, installations chimiques ou biologiques classées en terme de dangerosité,

etc.), mais aussi que l'indisponibilité du système est pénalisante pour l'entreprise et son environnement (effet économiques et sociaux de l'indisponibilité d'un système de transport urbain).

La maîtrise des risques est fondamentalement systémique du fait :

- ☐ de scénarios difficilement prédictibles combinant des aléas d'origines diverses (système, exploitation, soutien, environnement),
- ☐ de dysfonctionnements susceptibles de se produire du fait de la complexité des interactions sur les multiples interfaces tant techniques qu'organisationnelles,
- ☐ de la difficulté d'estimer les risques tant en terme de fréquence d'événements redoutés qu'en terme de potentialité de gravité,
- ☐ de la difficulté d'évaluer l'efficacité et la vulnérabilité des barrières de protection et de leur combinaison et notamment d'y détecter les maillons faibles,
- ☐ de la difficulté de définir et valider les plans de sauvegarde pour rétablir efficacement tout ou partie du système ainsi que les plans de réaction aux scénarios catastrophe.

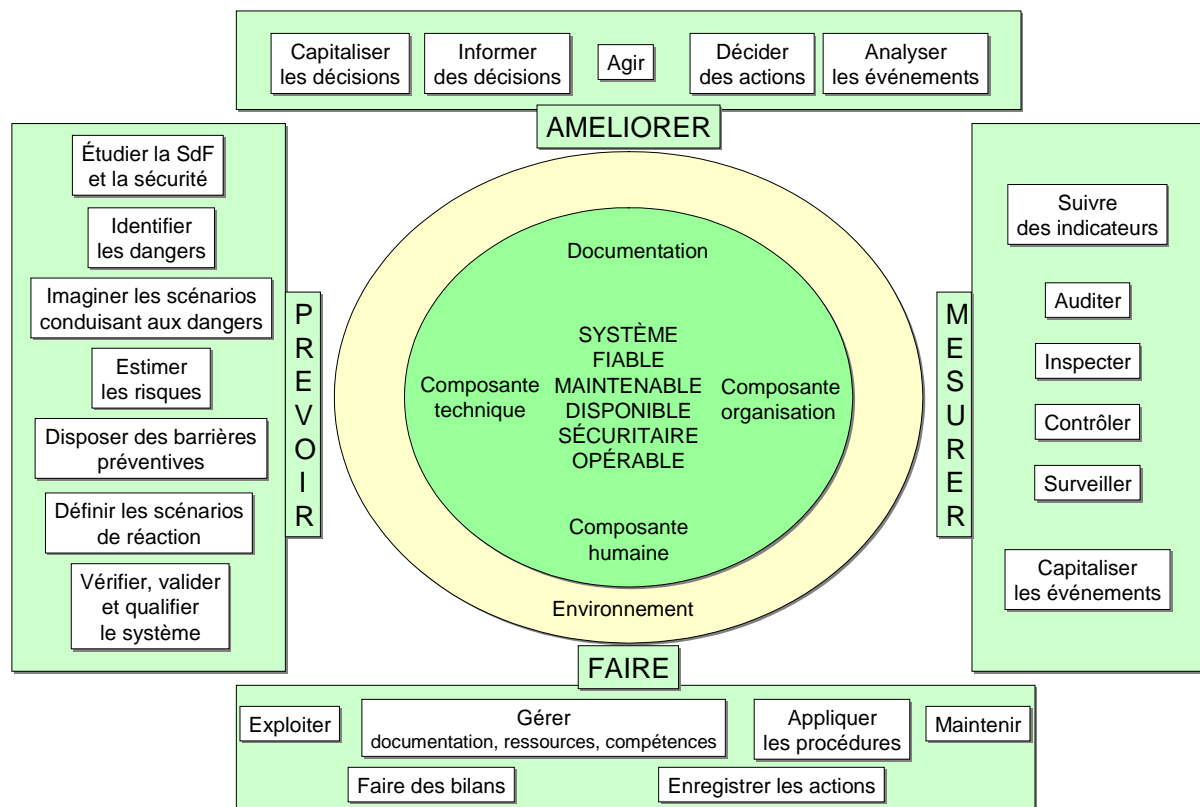


Figure 105 : Vue synthétique sur la maîtrise des risques système

La Figure 105 synthétise les différents types d'activité mis en œuvre dans la maîtrise des risques système selon les quatre thèmes du cycle PDCA :

- ☐ **Prévoir** : en principe préparé par l'IS, mais à ré-inventorier continûment,
- ☐ **Faire** : mettre en œuvre avec la qualité et les actions de sûreté et sécurité requises,
- ☐ **Mesurer**, contrôler, capitaliser l'expérience,
- ☐ **Améliorer** continûment.

13.6.7 Les normes de sûreté de fonctionnement

La norme IEC 61508 "*Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*" apparaît comme la norme « chapeau » du domaine FDMS (fiabilité, disponibilité, maintenabilité, sécurité) dans les systèmes industriels. Elle se décline selon les secteurs d'activité, par exemple : dans le ferroviaire par l'IEC 62 278 (EN50126) : FDMS, l'IEC 62279 (EN 50128) : logiciels et l'EN 50129 (matériels électroniques) ; dans l'automobile par l'ISO 26262 ; dans le nucléaire par l'IEC 61513 ; au niveau des processus industriels par l'IEC 61511 et pour les machines par l'IEC 62061.

La norme IEC 61508 introduit la notion de SIL (*Safety Integrity Level*) qui fixe le niveau d'occurrences et le niveau de qualité associé au processus pour réaliser les équipements (organisation, méthodes et outils, compétences) pour chacune des classes de risque définies dans la matrice gravité-probabilité d'occurrence. La notion de SIL utilisée dans les systèmes industriels et le domaine ferroviaire a son équivalence pour le domaine de l'aéronautique avec le DAL (*Development Assurance Level*) ou pour celui de l'automobile avec l'ASIL (*Automotive Safety Integrity Level*).

↑ PROBABILITÉ D'OCCURRENCE ↓	Fréquent		SIL 2	SIL 3	SIL 4
	Occasionnel			SIL 3	SIL 4
	Rare	RISQUES ACCEPTABLES			SIL 4
	Extrêmement rare				
		Négligeable	Mineur	Critique	Catastrophique
		← GRAVITÉ →			

Figure 106 : positionnement des SIL dans la matrice de criticité

Ces notions permettent de s'affranchir d'une évaluation globale qui est souvent impossible dans la pratique (par exemple on ne sait pas évaluer un processus ou un logiciel). Les SIL peuvent être attribués moyennement le respect de règles.

14 LA MISE EN ŒUVRE DE L'IS

Il ressort de tout ce qui précède qu'une condition de la réussite en IS, au-delà du préalable évident qu'est le savoir-faire technique, consiste dans une « bonne » mise en œuvre des processus d'ingénierie :

Bien faire (avec de « bonnes » pratiques) les « bonnes » activités au « bon » moment en utilisant les « bonnes » ressources

La maîtrise des processus d'ingénierie système est affaire de **management** : management de l'ingénierie au niveau des projets et des programmes, mais aussi des entreprises.

La maîtrise des processus d'ingénierie système est loin d'être innée : elle ne peut être obtenue que par une longue maturation et reste fondamentalement affaire d'**expérience** :

- ☐ expérience cumulée par les entreprises qui se traduit aujourd'hui dans des normes et modèles de maturité décrivant les bonnes pratiques, utilisables comme base pour définir et déployer les processus,
- ☐ et surtout expérience propre de l'entreprise, irremplaçable pour ajuster progressivement ce déploiement aux besoins spécifiques de l'entreprise et optimiser peu à peu les processus en maîtrisant le changement.

14.1 Présentation

Le chapitre 14.2 pose d'abord la **problématique générale de la bonne mise en œuvre de l'IS**.

L'efficacité implique une mise en œuvre cohérente des activités techniques, pour développer l'ensemble des produits du système en prenant en compte leurs cycles de vie et l'ensemble des disciplines et métiers concernés, conduisant à une **mise en œuvre intégrée de l'ingénierie système**.

Le chapitre 14.3 montre que cette mise en œuvre intégrée des processus techniques d'IS implique une coordination, donc **un management spécifique à l'IS dans le cadre des projets et programmes**.

- ☐ L'ingénierie système qui vise principalement l'optimisation du système à développer, donc l'effectivité du projet, et le management de projet qui se préoccupe plus particulièrement de l'optimisation du système de développement, donc de l'efficacité du projet, sont complémentaires et doivent être intimement intégrés.

Le paragraphe 14.3.1 introduit cette problématique en modélisant succinctement **les rôles respectifs des processus d'IS et de leur management et du management de projet** selon deux vues, une vue structurelle pour en relier les principaux concepts et une vue comportementale pour en présenter le déroulement fait de planification et de conduite maîtrisée (i.e. conforme au plan). Il met en évidence le besoin de plusieurs niveaux de management qui vont être détaillés dans les trois paragraphes suivants.

- ☐ Le management de projet et de l'IS dans le projet met en œuvre de multiples activités.

Le paragraphe 14.3.2 décrit le **management de projet dans une vision orientée processus**. Il se focalise ainsi plus particulièrement sur les aspects opératoires des activités de management des activités et tâches techniques du projet qui doivent être identifiées, estimées, budgétées, ordonnancées et programmées temporellement (ce qui correspond aux activités de planification) puis déroulées, suivies et maîtrisées en conformité au plan (ce qui correspond aux activités de conduite).

- ☐ La complexité du projet avec la multiplicité des activités techniques, des produits sur lesquels elles portent et donc des tâches à réaliser ainsi qu'avec celle des acteurs et métiers qui les réalisent, à laquelle s'ajoute la difficulté de mesure effective de l'avancement réel et des risques sur le restant à faire, nécessite un management stratégique du projet cadré par un jalonnement prédéfini.

Le paragraphe 14.3.3 illustre cette problématique de **management stratégique du projet** en structurant le projet selon un cycle de vie générique de projet avec ses jalons, points de visibilité sur l'avancement et de décision sur la suite à donner. Il relie cette vision managériale phasée du projet avec les aspects processus d'ingénierie et les stades à atteindre à chaque jalon ainsi qu'avec les processus contractuels : livrables, revues conjointes, acceptations.

- ❑ La maîtrise des programmes impliquant la cohérence de multiples projets se déroulant sur une longue période dans un environnement instable, implique une hiérarchie plus conséquente de niveaux de management actifs pendant toute la vie du programme.

Le paragraphe 14.3.4 illustre cet aspect du **management de programme** en proposant un modèle à 5 niveaux de maîtrise du **processus d'acquisition d'un système complexe** où la stratégie du programme doit rester cohérente avec la politique de l'entreprise, et les projets continuellement optimisés avec le programme. Ce même type de modèle serait applicable à un industriel devant commercialiser un produit-système complexe.

Le chapitre 14.4 montre que la mise en œuvre de l'IS dans les projets n'est pas « innée » : elle résulte d'une volonté du management de l'entreprise qui met progressivement en place les conditions de cette bonne mise en œuvre.

- ❑ Une entreprise ne mène pas qu'un seul projet : la coordination des activités d'IS doit aussi porter sur l'ensemble des projets.

C'est le rôle du management de l'IS dans l'entreprise. Il est supporté par des processus dits **processus d'entreprise** déjà énumérés dans cette partie au paragraphe 12.2.4. Ces processus contribuent, en préparant les décisions managériales et gérant les ressources communes, à fournir un environnement adéquat aux projets menés par l'entreprise de manière à la rendre compétitive en terme de mise en œuvre de l'IS. Parmi eux, le management des processus – qui consiste à définir les processus de l'entreprise, à les déployer sur les projets, à progresser dans leur mise en œuvre et à les améliorer en fonction de l'expérience – est développé dans le point suivant.

Cet aspect fait l'objet du paragraphe 14.4.1.

- ❑ La bonne mise en œuvre de l'IS dans l'entreprise n'est pas immédiate, c'est un effort dans la durée.

Le **déploiement de l'IS** dans l'entreprise est une affaire de longue haleine qui implique la mise en œuvre de projets de mise en place des processus et d'amélioration de leurs pratiques.

Ces **projets de progression**, qui ne concourent pas directement aux activités opérationnelles de l'entreprise, mais visent à l'amélioration de sa productivité, demandent une très forte implication du management. Ils sont fondés sur des **modèles de maturité** qui fournissent une échelle de progression dans la maîtrise des processus, et un modèle d'évaluation par rapport aux degrés de cette échelle.

C'est l'objet des paragraphes 4.4.2. à 4.4.4.

14.2 Mise en œuvre intégrée de l'ingénierie système

L'application des processus à l'ingénierie d'un système complexe conduit à un très grand nombre d'activités. L'efficacité, tant du résultat (système à faire) que du projet pour le faire, conduit à une exigence de bonne intégration/coordination de ces activités. La Figure 107 donne un aperçu de cette problématique (avec une terminologie destinée à la compréhension, mais non normative).

14.2.1 Ingénierie parallélisée

Le système est décomposé en sous-systèmes, et constituants. Le processus général de développement est donc répété sur les différents produits d'une strate de décomposition : chaque constituant de la strate doit être spécifié, conçu, intégré, vérifié et validé. Ce processus est évidemment exécuté en parallèle sur les produits de la strate.

14.2.2 Ingénierie itérative et progressive

Le processus ainsi parallélisé est repris de manière itérative sur les strates successives. La recherche progressive d'optimisation, l'émergence de nouveaux problèmes, les non-conformités détectées en vérification et validation conduisent à de multiples rétroactions sur les activités antérieures des processus qui se trouvent ainsi parcourus plusieurs fois, donnant lieu à des recouvrements entre strates.

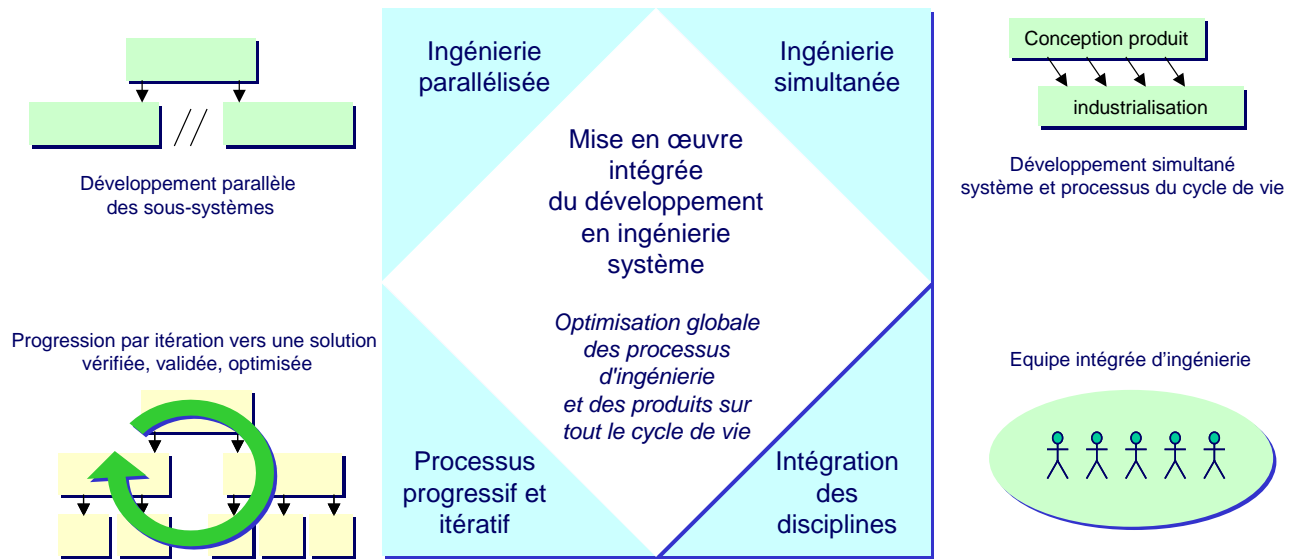


Figure 107 : les composantes de la mise en œuvre intégrée de l'ingénierie système

14.2.3 Ingénierie simultanée (ou concourante)

Afin de minimiser le « *time to market* », d'éviter des remises en causes pénalisantes et d'optimiser le produit sur l'ensemble du cycle de vie, l'ingénierie simultanée ou ingénierie concourante consiste à ne pas mettre en série les phases de conception du produit, de conception du système de production et de conception du système de soutien, mais à les traiter simultanément.

L'ingénierie associe ainsi, pendant tout le cycle de développement, les différents métiers du cycle de vie (conception, essais, production et fabrication, achats, soutien logistique, retrait et recyclage) afin d'éviter les pertes de temps et remises en causes propres à la prise en compte séquentielle des problèmes et de bénéficier des possibilités d'optimisation propres à chaque métier (solution techniquement optimisée, couple produit/procédé de réalisation optimisé, coût d'achat justifié, pertinence, facilité et rapidité des opérations de maintenance, maîtrise globale des coûts sur le cycle de vie).

14.2.4 Intégration des disciplines

La recherche constante d'optimisation du système sur tout son cycle de vie implique la participation des différentes disciplines aux différentes activités, nécessitant des équipes intégrées d'ingénierie émanant éventuellement des différents acteurs industriels concernés et regroupant, dès le début du projet, les compétences nécessaires : connaissance du besoin opérationnel, architectes et intégrateurs système, génies techniques et technologiques, spécialistes de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement, ergonomes, métiers du cycle de vie : développement, industrialisation, production, maintenance...

14.3 Management de projet et de l'IS dans le projet

L'ingénierie intégrée du système induit des éléments de complexité dans le projet pour faire le système et donc le management du projet qui doit en coordonner les différents aspects.

14.3.1 Vue générale sur le management de projet

Cette vue générale débute par un rappel des différentes approches déjà abordées dans ce document :

- ☐ le projet vu comme un système d'une part,

- ☐ l'approche processus appliquée au management de projet,
- ☐ l'approche processus appliquée aux processus techniques d'IS qui doivent être managés et coordonnés.

En partie 1, nous avons notamment appréhendé, de manière un peu théorique, le projet comme un système, en assimilant la planification de projet à l'ingénierie du « système-projet » et la conduite du projet à l'exploitation du « système-projet ».

Ce chapitre propose une vision plus pragmatique et opératoire du management de projet, du management de l'IS dans le projet et de leurs relations. Nous l'introduisons par deux approches succinctes et synthétiques récapitulant :

- ☐ les concepts principaux du management de projet (nous nous plaçons dans un cadre simplifié à deux niveaux de management),
- ☐ la mise en œuvre du management de projets avec les rôles respectifs de l'ingénierie et du management de projet pour la planification et la maîtrise du projet.

14.3.1.1 Introduction et rappels : Projet, management de projet, ingénierie système

14.3.1.1.1 Le projet vu comme un système

Dans le chapitre 3 de la première partie, le projet est appréhendé comme un système devant être piloté :

- ☐ Sur le plan global comme un système dans son environnement :
 - développant une solution répondant à un problème : les objectifs du projet (voir Figure 17).
 - sous contraintes : budget, délais, mais aussi environnement (voir Figure 18).
 - dans le contexte d'un cycle de développement (voir Figure 19 et Figure 20).
- ☐ Sur le plan fonctionnel interne comme un ensemble de processus :
 - processus techniques (ou d'ingénierie) focalisés sur l'obtention d'une solution optimisée, décomposés itérativement en tâches qui sont des ajustements d'activités de processus technique génériques aux produits à réaliser (voir Figure 21 et Figure 22).
 - processus de management (de projet) focalisés sur la tenue optimisée des objectifs du projet, planifiant et pilotant la réalisation des tâches en leur allouant au mieux les ressources potentielles eu égard aux contraintes (délais, budget) à différents niveaux de décision (voir Figure 23).
- ☐ Sur le plan organique comme une organisation, optimisée sous contraintes d'environnement industriel, pour réaliser les tâches (généralement regroupées en lots de travaux pour être attribuées à un acteur de l'organisation).

14.3.1.1.2 Les processus de management de projet

Dans le chapitre 12.2.2 de cette partie 4, les processus de management de projet sont présentés comme l'application du processus générique de management conforme au cycle PDCA (*Plan, Do, Control, Act*) aux différents domaines traditionnels du management de projet (voir Figure 65) :

- ☐ Domaines principaux : processus de management du contenu (les tâches techniques et leurs résultats), des coûts, des délais, des moyens, des ressources humaines, de la qualité et des risques.
- ☐ Domaines de support : processus de management des données et de la configuration, de l'information, de la communication, du contrat client et de la réglementation applicable ainsi que des sous-traitances. Ces processus sont utilisés en tant que de besoin par les autres processus de management et/ou les processus techniques.
- ☐ Dans le contexte d'une approche intégrée : processus de coordination global incluant la définition de la stratégie et des objectifs du projet, l'intégration/coordination des processus, les prises de décisions à caractère général dans une vision systémique.

14.3.1.1.3 Le management des processus techniques d'IS

Dans le chapitre 12.2.1 de cette partie 4, l'ingénierie système est présentée comme la mise en œuvre coordonnée d'un ensemble de processus techniques. Cette coordination est du ressort du management de l'IS dans le projet. Elle consiste à ajuster les processus et activités aux besoins propres du projet, en choisissant les méthodes et outils adéquats, et à les mettre en œuvre dans le contexte du management de projet.

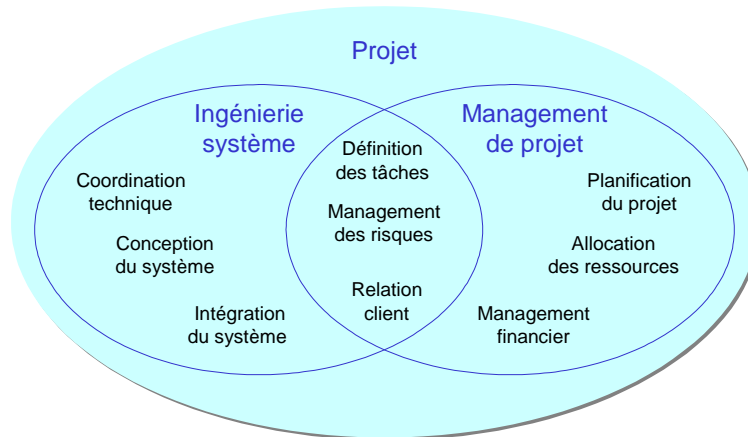


Figure 108 : Ingénierie système et management de projet (selon INCOSE SE-Book)

La Figure 108 inspirée du SE-Book de l'INCOSE, montre de manière synthétique les rôles respectifs de l'IS et du management de projet, ainsi que leur intersection.

Management de l'IS et management de projet sont ainsi complémentaires et indissociables :

- ☐ c'est l'IS qui définit, effectue et contrôle techniquement les activités techniques à réaliser avec pour responsabilité la tenue des exigences du système, en l'équilibrant sur tout le cycle de vie, projet de développement compris,
- ☐ c'est le management de projet qui conduit ces mêmes activités en distribuant les travaux correspondant aux entités du projet et en allouant et gérant les ressources, avec pour responsabilité la tenue optimisée des objectifs du projet (résultat versus ressources utilisées, budget, délais), qualité technique du produit comprise.

Nous nous attachons dans ce chapitre à préciser ces rôles. Notons dès maintenant que, quelles que soient les options organisationnelles prises pour le management (management unique ou management bipolaire, projet et technique), l'essentiel est de garantir l'équilibre entre la vision des techniciens, souvent trop focalisée sur les seuls aspects technologiques et la qualité du système, et celle des gestionnaires qui risquent de se focaliser sur les seuls aspects d'économie de ressources et de tenue des objectifs de coûts et de délais du projet.

14.3.1.2 Les concepts du management de projets

La Figure 109 présente le domaine de la gestion de projet par un modèle sémantique simplifié reliant ses principaux concepts. Elle met notamment en évidence, de manière très schématique, ce qui ressort plutôt du management stratégique et ce qui ressort plutôt des managements opératoire et technique.

- ☐ Pour le management stratégique, le projet est découpé temporellement en **phases du cycle de vie du projet** choisi.

Les jalons de fins de phase sont les points de visibilité sur le projet et de décision concernant le passage à la phase suivante. Ils font l'objet d'une revue de projet, en principe confiée à une équipe indépendante du projet et de sa hiérarchie, qui a pour but de fournir au management une vision objective de l'état du

projet : résultats obtenus versus objectifs du plan directeur et analyse des risques (en cas de doute sur l'état du projet, le management stratégique peut, indépendamment des jalons, être conduit à commander un audit).

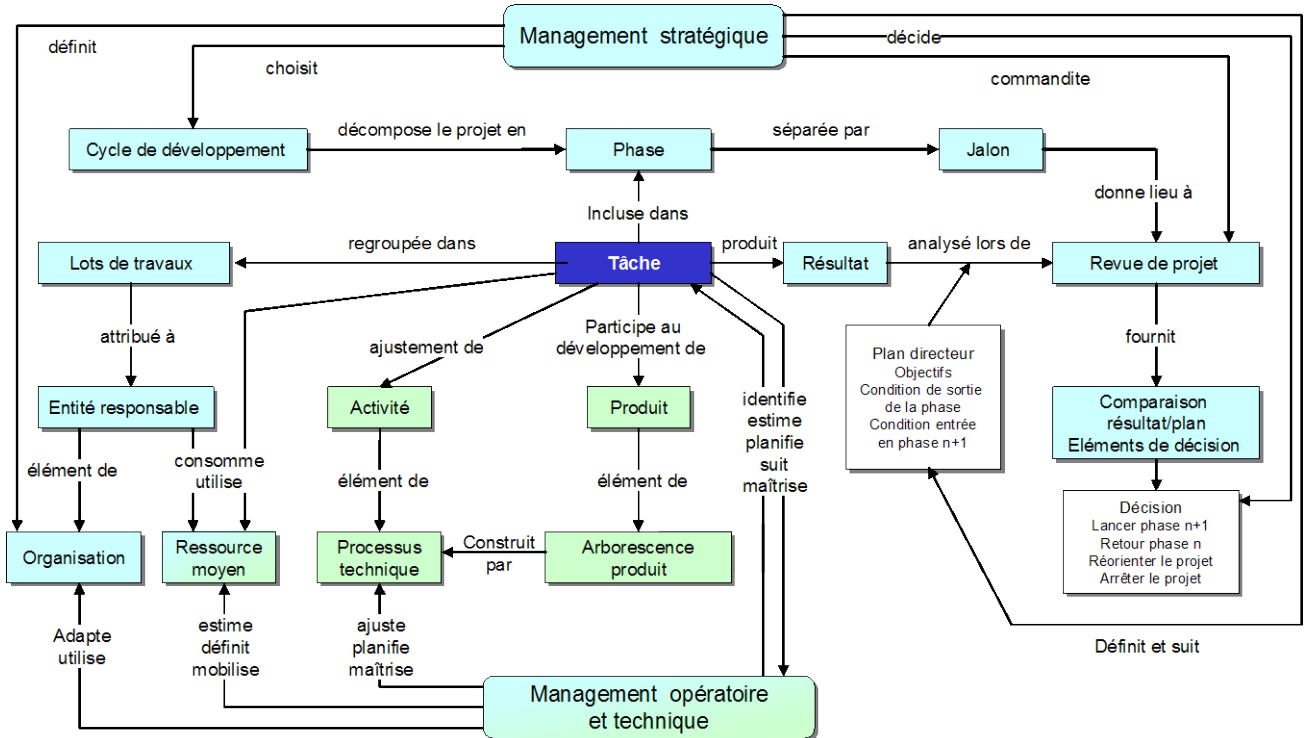


Figure 109 : Concepts du management de projet

- ❑ Pour le management opératoire ou opératif, le projet est découpé en **tâches**.

Une tâche est l'ajustement d'une activité de processus technique à un élément de l'arborescence des produits à réaliser (constituants du système, produits contributeurs). Elle consomme des ressources et utilise des moyens. Elle est confiée (généralement dans le cadre d'un lot de travaux) à une entité de l'organisation industrielle. Elle est incluse dans une phase du cycle de vie du projet.

Le projet fait ainsi l'objet de plusieurs niveaux de planification et de suivi :

- ❑ Au niveau stratégique : Planning directeur cadré sur le cycle de vie, définissant les étapes significatives des principales réalisations, leurs critères d'accomplissement, les jalons ou revues auxquels ils pourront être vérifiés.

On distingue par exemple les revues de spécification permettant de passer à la conception, les revues de définition préliminaire permettant de passer à la conception détaillée des constituants de l'architecture, les revues critiques de définition permettant de passer à la réalisation des constituants, les revues de réception de prototypes et in fine de qualification de la définition permettant de passer à l'industrialisation ou directement la production.

- ❑ Au niveau opératoire : Planning des tâches. Il est repris en fonction des décisions de niveau stratégique lors d'un changement de phase, détaillé et affiné pour la phase suivante. Il peut être aussi adapté à l'intérieur des phases en fonction de l'avancement et des difficultés du projet.

14.3.1.3 La mise en œuvre du management de projet

La Figure 110 présente de manière synthétique le déroulement de la mise en œuvre du management de projet par un modèle de flux d'activités mettant en regard les principales activités de planification (identification, estimation, planification) et de conduite (suivi, évaluation, maîtrise) appliquées au contenu, aux ressources, aux coûts, au planning, à la qualité et aux risques. Elle met notamment en évidence, les rôles respectifs de l'ingénierie (en vert) et du management de projet (en bleu).

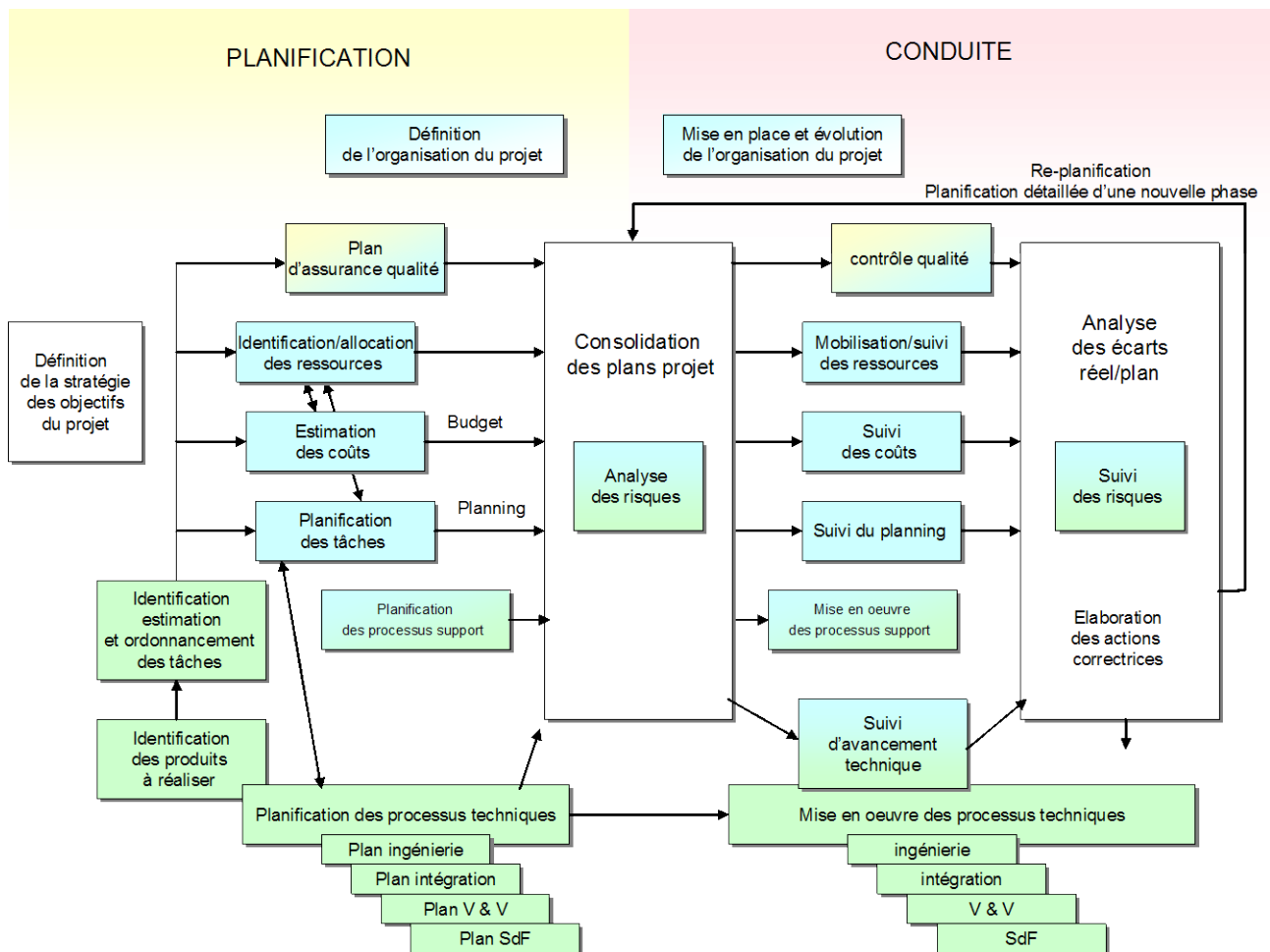


Figure 110 : Mise en oeuvre du management de projet

14.3.1.3.1 Mise en œuvre de la planification

14.3.1.3.1.1 Rôle de l'ingénierie en planification

C'est à l'ingénierie de définir le travail technique :

- ☐ identifier et ajuster les processus techniques aux besoins d'analyse du problème et de conception du système pour y répondre dans le contexte du cycle de vie choisi,
- ☐ développer l'arborescence des produits à réaliser,
- ☐ identifier les tâches, définir les méthodes et outils pour les réaliser, estimer leurs besoins en ressources et moyens, les ordonnancer en fonction de leurs dépendances.

- ☐ identifier les risques (risques techniques et risques projet), les estimer (en termes de probabilité d'occurrence et de gravité des conséquences) et définir les actions en réduction de risque adéquates (maquettes de validation de concept d'emploi ou d'interface utilisateur, prototype de faisabilité ou de vérification de performances, solution de rechange en cas d'échec d'une solution novatrice, etc).

C'est aussi à l'ingénierie de formaliser les plans techniques en tenant compte des résultats de la planification globale du projet.

14.3.1.3.1.2 Rôle du management de projet en planification

C'est au management de projet de faire la planification globale du projet dans le contexte du cycle de vie choisi et des organisation et environnement industriels existants tout en tenant compte des impératifs techniques :

- ☐ identifier et planifier les ressources mobilisables (organisation, sous-traitants) allouables aux tâches,
- ☐ estimer les coûts et répartir le budget, planifier les dépenses et la trésorerie
- ☐ faire le planning des tâches sous contrainte de délais en fonction des disponibilités de ressources,
- ☐ planifier le suivi des risques et les actions en réduction de risques.

C'est aussi au management de projet de définir et planifier ses propres processus ainsi que, souvent dans un management commun projet/ingénierie, les processus de support au projet (tels que management de l'information, de la communication, de la sous-traitance, des risques, des finances et de la trésorerie...).

C'est à l'assurance qualité du projet de définir les normes de qualité applicables en fonction de la politique qualité, de vérifier la conformité des plans à ces normes (en vérifiant la façon dont les projets ajustent les processus à leurs besoins), de rédiger le plan qualité planifiant les contrôles qualité (en particulier les vérifications de bonne exécution des processus ajustés prévus).

14.3.1.3.1.3 L'obtention des plans du projet

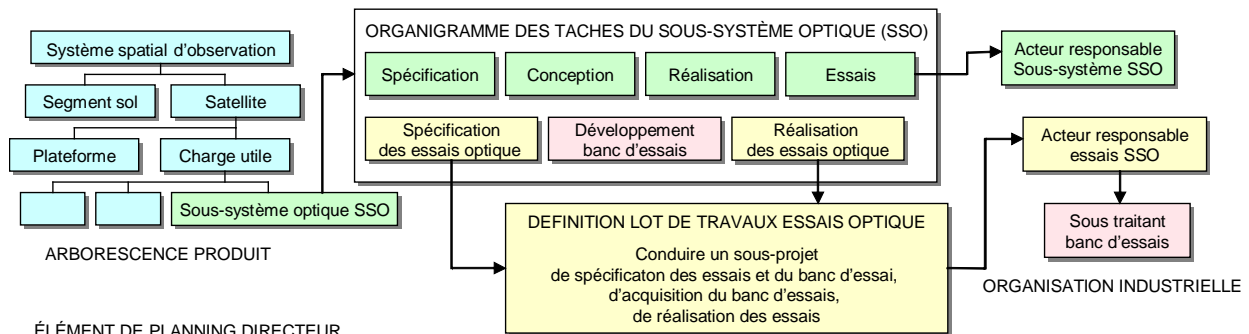
L'ensemble du processus de planification conduit :

- ☐ aux plans techniques planifiant la réalisation des processus techniques,
- ☐ aux plans de management : plannings directeur et détaillés, budget, plans de management relatifs aux différents domaines du management de projet (par exemple finance et trésorerie, communication, qualité, sous-traitances, risques, etc) et aux processus support, par exemple gestion de configuration.

Ces différents plans font l'objet de consolidation et éventuellement de regroupement (par exemple, pour un projet modeste un plan d'ingénierie regroupant les plans techniques, un plan de management couvrant les domaines du management et de support du projet, le plan qualité). Le résultat fait l'objet d'une analyse de risques projet (dont on déduit le plan de management des risques).

La Figure 111 explicite, à titre de synthèse, les relations entre l'arborescence produit (*product breakdown structure*), l'organigramme des tâches (*work breakdown structure*), la définition des lots de travaux (*statement of work*), l'organisation industrielle (*organisation breakdown structure*), le planning directeur et les plannings détaillés, sur l'exemple très schématisé du positionnement d'un lot de travaux concernant la réalisation des essais du sous-système optique (SSO) embarqué dans un système satellitaire d'observation.

IDENTIFICATION DES TÂCHES ET DÉFINITION DES LOTS DE TRAVAUX



ÉLÉMENT DE PLANNING DIRECTEUR

ETAPES SIGNIFICATIVES	EVENEMENTS		CRITERES D'ACOMPLISSEMENT
Conception préliminaire compétente SSO	Revue de conception préliminaire satellite		Analyse fonctionnelle SSO complète et validée Architecture SSO modélisée et simulée Spécification des essais optique
Sous-système optique SSO qualifié		Revue de qualification constituants charge utile	Essais satisfaisants de qualification du sous-système optique SSO

ÉLÉMENT DE PLANNING DÉTAILLÉ

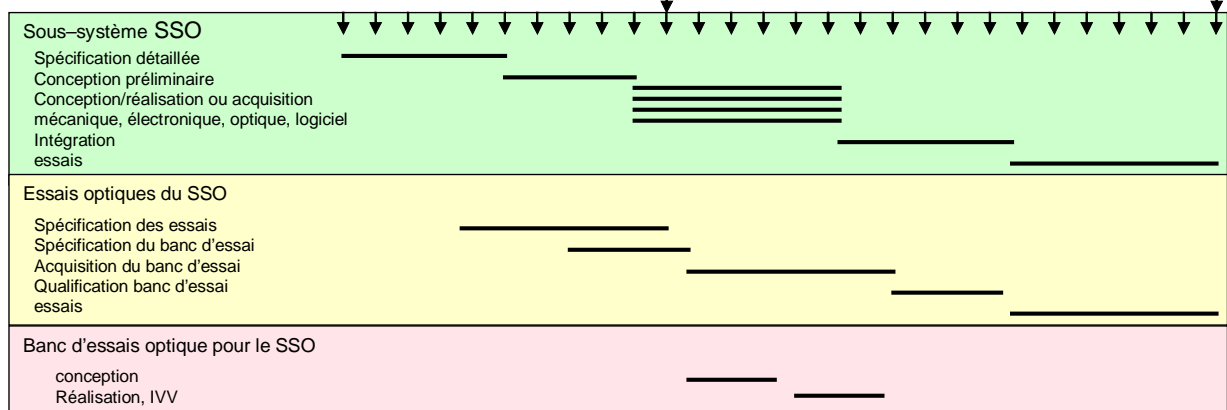


Figure 111 : Relations entre éléments de planification

14.3.1.3.2 Mise en œuvre de la conduite du projet

C'est à l'ingénierie de mettre en œuvre les tâches techniques d'ingénierie conformément aux plans techniques afin d'en assurer les résultats, d'évaluer les écarts d'avancement par rapport au plan, de proposer les actions correctrices en analysant leurs impacts et leurs risques ou encore de ré-estimer le reste à faire.

Elle met notamment en œuvre et contrôle techniquement les processus de V & V, ainsi que les processus d'analyse système (évaluation comparaison des solutions candidates) et d'analyses de risques, préparant ainsi les décisions managériales.

C'est au management de projet d'assurer la conduite du projet. Il s'agit de mobiliser et suivre les ressources, de suivre de manière intégrée les écarts coûts/budget, planning/délais, en tenant compte des écarts d'avancement et de décider des actions correctrices à mettre en œuvre en tenant compte des risques, avec mise à jour éventuelle de la planification. C'est aussi au management de projet de statuer sur la suite à donner aux résultats de V & V, et sur les propositions de choix et de parades aux risques préparés par l'analyse système.

C'est au contrôle qualité du projet de réaliser les contrôles planifiés dans le plan qualité montrant notamment que l'ensemble des processus (technique, management, support) sont faits conformément aux normes de qualité (le contrôle qualité apparaît comme faisant la V & V des processus). En particulier, il vérifie que toutes les opérations de V & V planifiées ont été faites en conformité au plan de V & V.

On note que cela entraîne de nombreux échanges d'information entre ingénierie et conduite de projet. Ils sont schématiquement illustrés par la Figure 112. La maîtrise de l'information et de la communication est essentielle en conduite de projet.

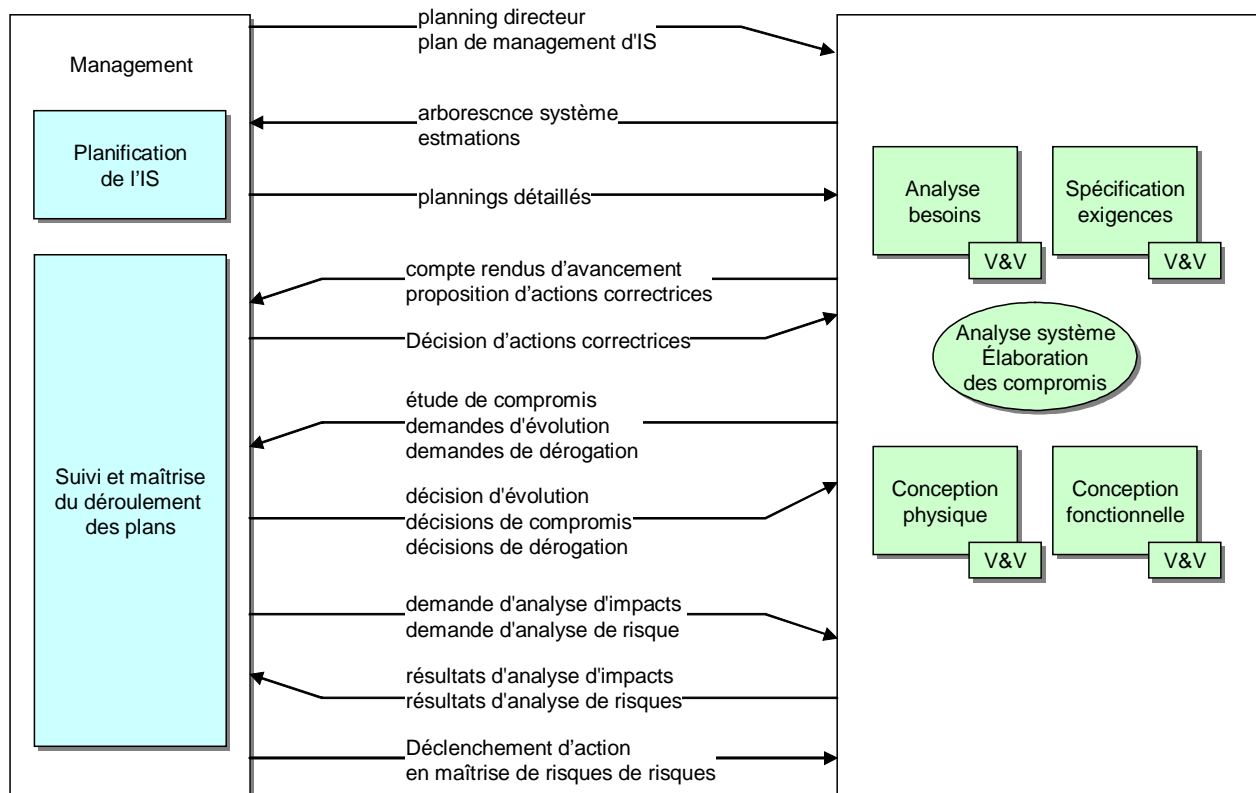


Figure 112 : Echanges d'information ente management de projet et IS (boucle d'ingénierie)

14.3.2 Les processus de management de projet et de l'IS dans les projets

Ce chapitre détaille les processus de management de projets, en se focalisant plus particulièrement sur les activités de management technique de l'IS. Il s'inspire des différentes normes (notamment IEEE 1220 pour le management technique). Comme toute vision processus, il s'agit de décrire de manière générique les activités à faire et les résultats qu'on en attend, indépendamment du contexte (cycle de vie et phasage, organisation industrielle, acteurs impliqués...)

14.3.2.1 Les activités du processus de planification

La Figure 113 présente les principales activités de planification de l'IS. On y voit apparaître :

- ☐ Des aspects relevant plutôt du domaine de l'ingénierie et de son management (en vert sur la figure) :
 - définition de la mise en œuvre des processus techniques,
 - définition du travail technique et des tâches,
 - définition des plans techniques.
- ☐ Des aspects concernant plutôt le management de projet (en bleu sur la figure) :
 - définition de la stratégie de management et du cycle de vie,
 - définition du planning et de l'organisation,

- définition et allocation des lots de travaux.

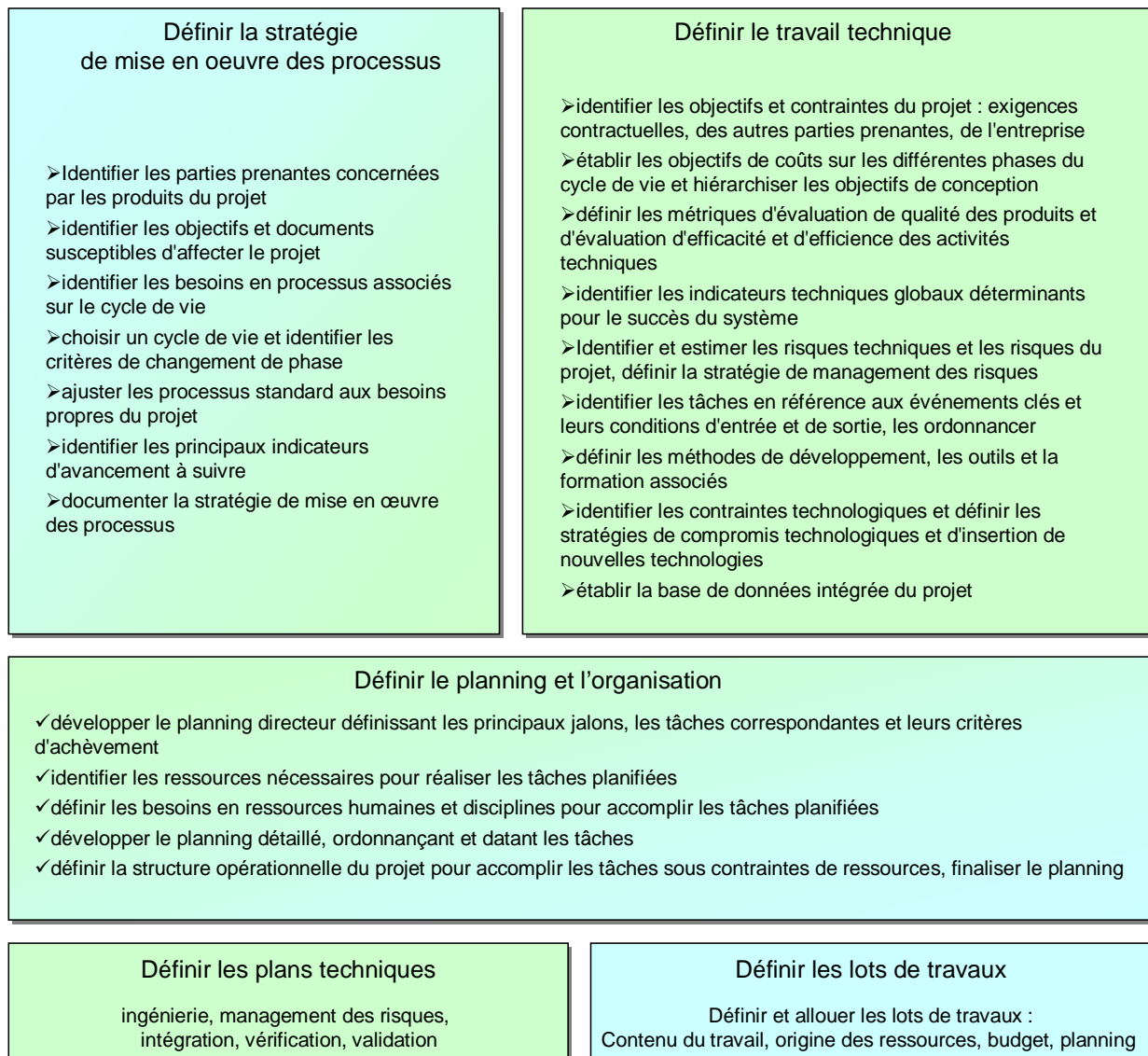


Figure 113 : Activités de planification de l'IS

Ce processus de planification est fondamentalement itératif. En voici les deux raisons majeures :

- ☐ L'imbrication entre les processus technique et les processus de management :

Ce sont les processus techniques qui lors des décompositions, définissent l'arborescence des produits dont se déduisent les tâches que le management doit planifier. Mais c'est justement de cette planification que résultent les plans de ces processus techniques. Il y a donc affinement de la planification au fil des itérations dans la boucle d'ingénierie : système, sous-système, constituant... De plus les plans détaillés d'une phase ne peuvent être définis qu'à l'issue de la phase précédente : ainsi, par exemple, le plan d'intégration ne pourra être finalisé qu'après la définition de l'architecture.

- ☐ Toute planification est un problème d'optimisation :

Il s'agit d'une optimisation sous contraintes (contraintes d'ordonnement dans le réseau de tâches, contraintes globales de budget et de délais à répartir, contraintes de limitation des ressources et moyens, contraintes de l'organisation industrielle existante). L'optimisation est compliquée du fait des multiples incertitudes (estimations, disponibilité et adéquation (notamment compétences) effectives des

ressources, qualité des sous-traitants), ce qui implique une pondération par les risques. La recherche de la solution est généralement itérative, tout en étant supportée et guidée par des outils d'ordonnancement de projet.

14.3.2.2 Les activités de suivi et de maîtrise

La Figure 114 présente les principaux types d'activités (inspirés des normes et notamment de l'IEEE 1220), pour conduire la réalisation de l'IS. Il s'agit de suivre l'avancement des processus et des produits en les comparant aux plans, de décider des réactions aux écarts réel/planifié et de conduire le changement correspondant par la maîtrise de l'information. On distingue :

- ❑ Des activités relevant plutôt de la maîtrise technique de l'IS :
 - suivi et d'évaluation de l'avancement du développement des produits (par exemple à partir du suivi de la maturité des exigences),
 - et en support, gestion de l'information résultant du travail de développement conformément au plan.
- ❑ Des activités de management technique s'apparentant plus au management de projet :
 - suivi et évaluation de l'avancement du projet par rapport aux plans, au budget et au planning,
 - et en support diffusion de l'information conformément au plan de communication.
- ❑ Des activités de revue et, bien sûr, de prise de décisions.

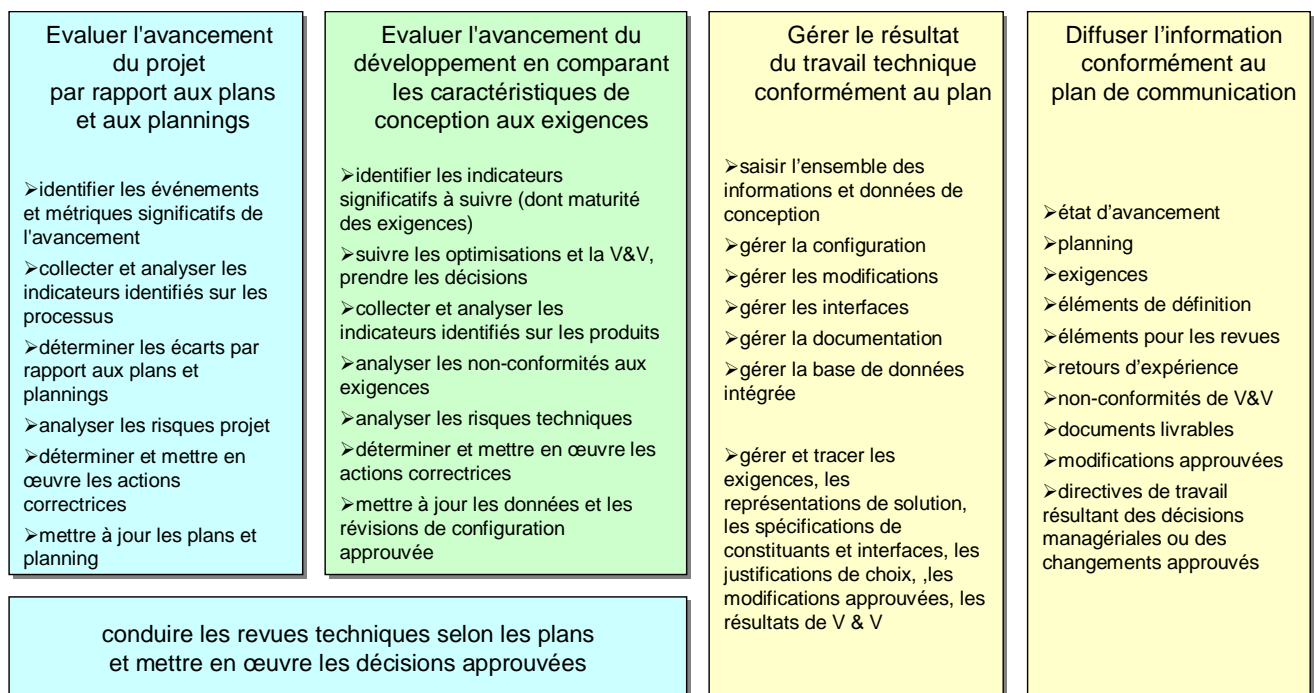


Figure 114 : Les activités de conduite de l'ingénierie système

Un projet complexe se comporte comme un système très sensible aux variations de conditions initiales. Un petit écart par rapport au planning non traité peut avoir très rapidement de graves répercussions par effet boule de neige dû aux multiples interactions (une détection de non-conformité dans une tâche peut être due à la tâche et sa correction peut entraîner des propagations sur les tâches aval, mais aussi à des erreurs non détectées en amont entraînant des rétroactions sur les tâches amont qui se propageront également).

Plus on attend pour réagir, plus les actions correctrices impliquent de réfections, lourdes et coûteuses tant en budget qu'en délais (sans compter leur effet sur le moral des équipes).

On y voit l'importance de bien conduire les activités de V & V pour assurer la validité des produits des tâches (qui sont aussi les entrées des tâches qui en dépendent), mais aussi de se donner de bons indicateurs d'avancement. Contrairement au génie civil, par exemple, où l'on voit s'élever les ouvrages, on a en effet peu de visibilité sur l'avancement réel du projet, les tâches d'ingénierie ou d'intégration étant par nature abstraites et soumises à de nombreuses rétroactions.

14.3.3 Management stratégique de projet fondé sur un cycle de vie

A travers les processus de management du projet et leurs activités de planification et conduite, le point précédent s'est focalisé sur l'aspect opératoire de management des activités des processus d'ingénierie dans le projet. Ces activités de management sont déléguées (délégation, sous-traitance...) dans l'arborescence organisationnelle du projet en fonction des allocations d'activités, tâches, lots de travaux... créant ainsi une arborescence hiérarchique des responsabilités.

Nous abordons maintenant le ou les niveaux de pilotage stratégique du projet qui prennent les décisions majeures tant pour le projet que pour le système. Les usages du pilotage stratégique restent aujourd'hui assez dépendant des secteurs d'activités : nous nous contentons ici d'éléments généraux inspirés notamment de pratiques dans le domaine militaire.

14.3.3.1 Management stratégique, acteurs et décision

Le management stratégique du projet met en jeu tout ou partie de ses principaux acteurs en vue des décisions majeures. Dans notre hypothèse, ce sont « l'acquéreur » du système (ou son représentant), le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre systémier, les coopérants tels que sous-systémiers et équipementiers principaux.. On distingue à titre d'exemple :

- ☐ Les décisions stratégiques pour le système ou le projet, qui concernent le client, le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre voire les coopérants principaux, telles que :
 - validation du besoin à satisfaire et des hypothèses associées,
 - décision de lancement (ou d'arrêt) du projet,
 - choix du concept de la solution,
 - validation des exigences système,
 - choix des acteurs principaux : maîtrise d'œuvre et coopérants principaux,
 - choix de la politique d'acquisition,
 - choix de la logique de déroulement,
 - choix du modèle économique et mise en place de la logique de financement.
- ☐ Les décisions générales d'organisation et de pilotage du projet, qui concernent plus particulièrement le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre, telles que :
 - allocation des objectifs aux acteurs principaux,
 - définition et mobilisation des ressources nécessaires au projet,
 - formalisation de l'organisation du projet,
 - formalisation des délégations et du reporting,
 - organisation de la surveillance du projet,
 - pilotage et suivi permanent du projet et traitement des écarts.
- ☐ Les décisions à caractère plus technique pour le projet, concernant plus spécifiquement le maître d'œuvre et ses coopérants, telles que :
 - choix et mise en place des processus d'ingénierie concourant à l'obtention de la définition et à sa justification, puis la mise en place de l'organisation industrielle,
 - lotissements des configurations à produire : système unique, prototype(s) et/ou présérie puis série pour les systèmes répétitifs, soutien à l'exploitation.

14.3.3.2 Management stratégique, cycle de vie et jalonnement

Le management stratégique du projet, axé sur la maîtrise progressive des choix et des risques, ainsi que sur la maîtrise de l'avancement du projet et du reste à faire, s'appuie sur une modélisation du projet selon un cycle de vie global, intégrant les phases de développement/réalisation, mais aussi les phases de vie du système jusqu'à son démantèlement. La décision d'utiliser un type de cycle de vie est prise au niveau stratégique, elle peut être justifiée et proposée au niveau opératif.

Le management est ainsi jalonné par des points de contrôle selon le cycle de vie planifié du projet pour les décisions majeures stratégiques et de pilotage, et, entre ces jalons, cadencé par des points d'avancement périodiques (voir Figure 23).

- ❑ Lors de jalons planifiés au long du cycle de vie projet : décisions majeures telles que validation de l'état du projet, autorisation de passage à la phase suivante ou reprise d'éléments de la phase précédente, réorientation des objectifs ou évolution de l'organisation, validation des plans pour la suite... Ces décisions sont généralement préparées par des revues de projet réalisées par une équipe de « reviewers » indépendants du projet et de sa hiérarchie afin d'en fournir une vision objective : état du projet, écarts par rapport aux objectifs spécifiés pour le jalon, réalisme des prévisions pour la suite, état des risques (voir Figure 115 et encadré Figure 116).
- ❑ entre les jalons : suivi de l'avancement du projet et des risques au fil des « reportings » généralement périodiques (remontée d'états d'avancement avec indication des écarts par rapport aux plans, des problèmes nécessitant décision, de l'évolution des risques avec propositions de solutions et éléments de justification et prises en retour de décisions courantes de traitement des écarts, des problèmes et des risques).

C'est au niveau des jalons, coïncidant généralement avec des transitions entre phases du cycle de vie du projet, que l'acquéreur (ou son représentant) prononce les acceptations contractuelles des livrables, dont celle du système (ou de son premier exemplaire) traduisant le transfert de propriété, ou encore les qualifications.

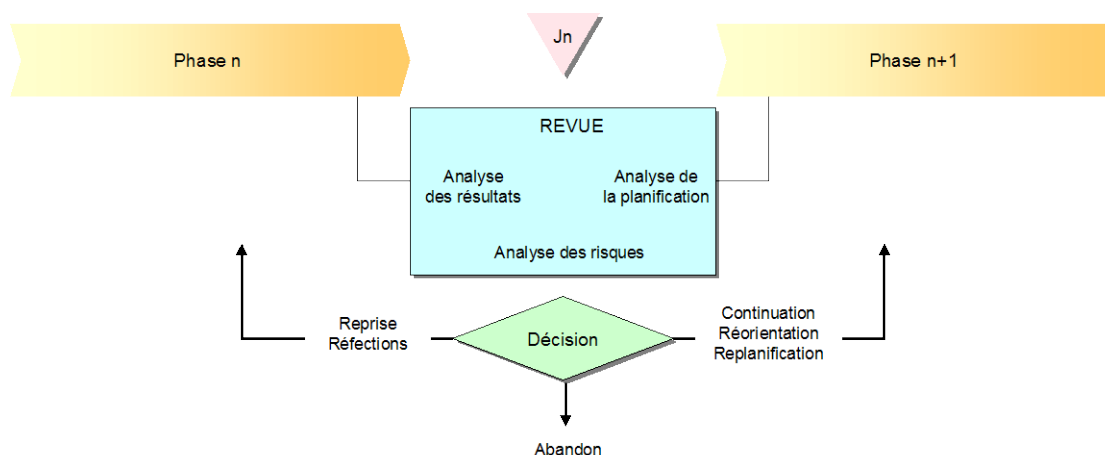


Figure 115 : Jalon, revue, décision

Revue et audits

Les revues sont planifiées aux principaux jalons, avec des objectifs prédéfinis. Les audits sont déclenchés, en cas de besoin, par le management qui en définit l'objectif. En principe revues et audits sont réalisés par une équipe d'auditeurs indépendants tant du projet que de son management afin de fournir une vision aussi objective que possible de l'état du projet.

L'équipe d'auditeurs est généralement composée de « pairs » par rapport à l'équipe projets ainsi que d'experts choisis en fonction des besoins. Elle est placée sous la responsabilité d'un président.

La Figure 116 propose, à titre d'exemple, un protocole de revue. Les revues et audits sont suivis de réunions de management pour les prises de décision en fonction du compte rendu de revue d'une part, fournissant l'état du projet dont écarts par rapport à l'objectif, prévisions et risques, et en fonction des évolutions de l'environnement d'autre part. Ces réunions, par exemple entre acquéreur, maître d'ouvrage et maître d'œuvre sont quelquefois appelées revues conjointes.

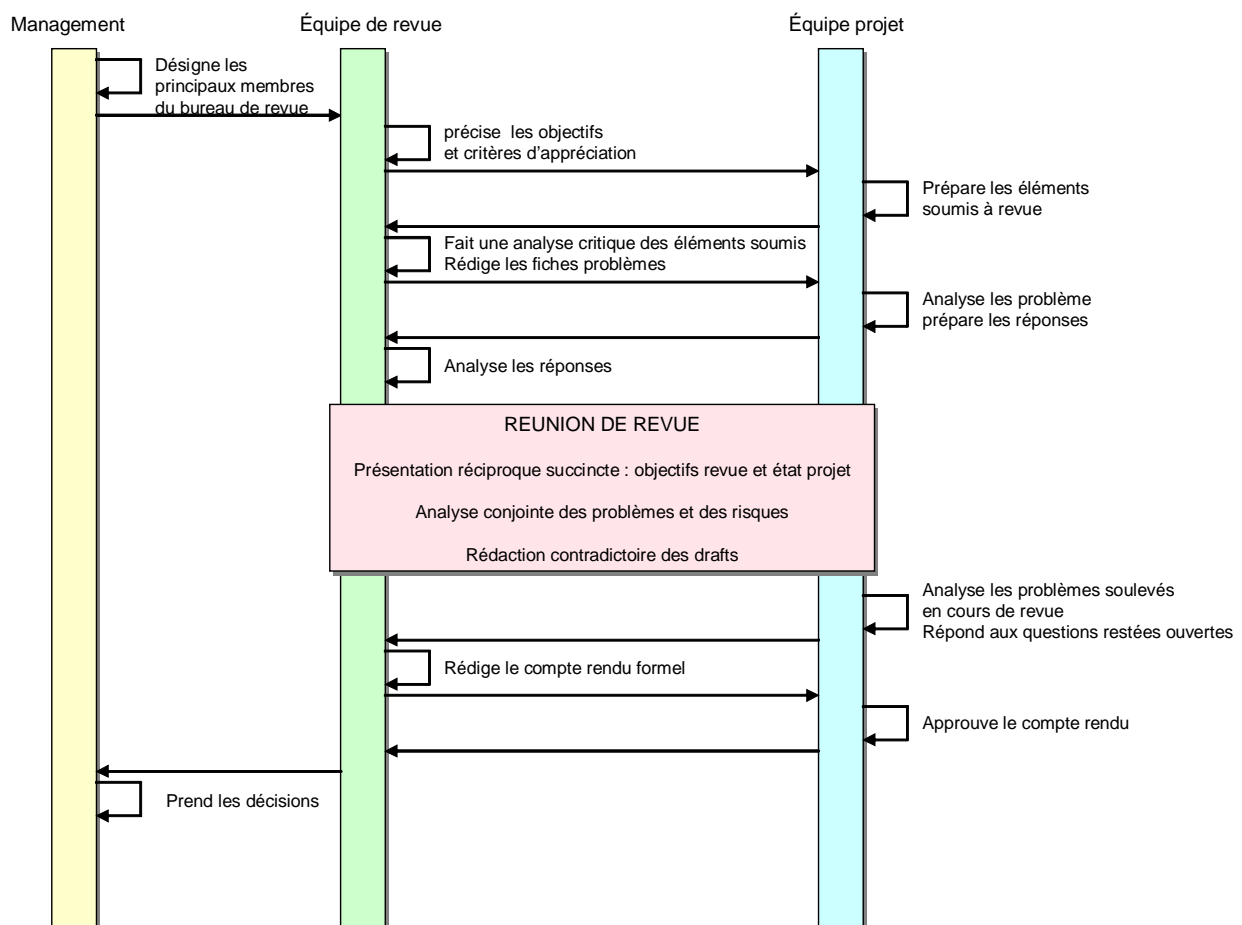


Figure 116 : Exemple de processus de revue

La Figure 117 propose un cycle de vie traditionnel de projet selon la vue de l'industriel maître d'œuvre ou réalisateur du système (notamment inspiré de cycles de vie utilisés dans les systèmes de défense). Afin de rester général, il est vu à un niveau très global ne montrant que les jalons majeurs de décision. Nous en détaillerons les phases par la suite. Il sépare les phases d'avant projet de celles du projet proprement dit qui recouvre le cycle de vie système.

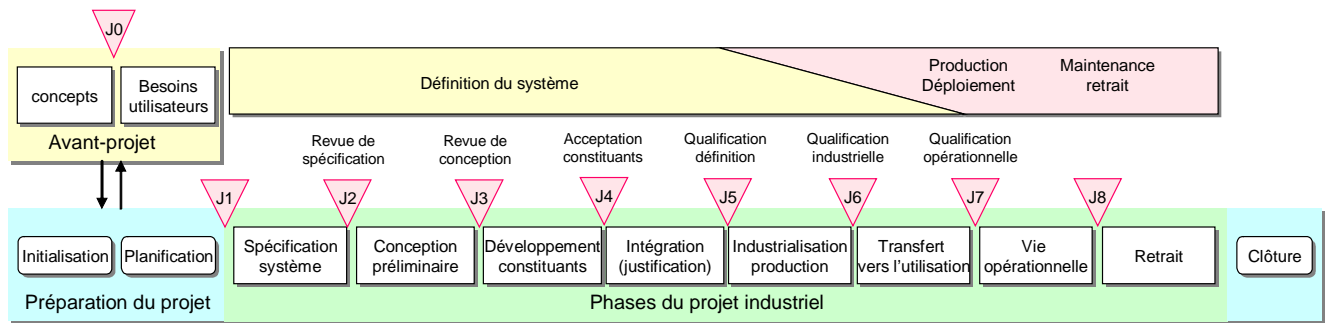


Figure 117 : cycle de vie traditionnel d'un projet industriel

La décision d'entrée dans une nouvelle phase correspond au franchissement d'un jalon :

- ☐ Le jalon J0 correspond à la décision de lancement des études de besoins : les études amont ont donné un éclairage suffisant sur la finalité, les concepts et les contours d'un futur système ainsi que sur l'opportunité d'approfondir sa faisabilité et ses besoins,
- ☐ Le jalon J1 correspond à la décision de lancement des phases d'ingénierie conduisant à la définition du système après avoir validé les concepts à retenir et défini ainsi le périmètre du projet proprement dit,
- ☐ Le jalon J2 correspond à la décision de lancement de la conception architecturale (ou conception préliminaire) après avoir validé la spécification du système (exigences système)
- ☐ Le jalon J3 correspond à la décision de lancement du développement des constituants du système, après validation de sa conception préliminaire.
- ☐ Le jalon J4 correspond à la décision de lancement de la phase d'IVV conduisant à la qualification de la définition du système, après validation ou acceptation des constituants nécessaires ou validation de leur définition.
- ☐ Le jalon J5 correspond à la décision de lancement de l'industrialisation et de la mise en place de la production du système, après qualification de sa définition,
- ☐ Le jalon J6 correspond à la qualification industrielle du système autorisant sa production de série
- ☐ Le jalon J7 correspond à l'acceptation du système, et/ou à sa qualification opérationnelle autorisant sa mise en exploitation
- ☐ Le jalon J8 correspond à la décision de retrait de service (démantèlement, recyclage...).

A chaque jalon (J8 excepté), la décision peut être la reprise d'éléments de la phase précédente, le franchissement du jalon, la réorientation, voire l'arrêt du projet. Certains jalons peuvent faire l'objet de bilans, avec mise en mémoire des expériences acquises. C'est le cas généralement en fin de réalisation (jalon J7) pour le retour d'expérience de conception/réalisation et, bien évidemment en clôture du cycle de vie pour bilan final du projet, intégrant l'ensemble des cycles de vie système et projet.

Dans le cas d'un système en un seul exemplaire, les phases se succèdent. les activités d'industrialisation et production sont réparties dans les phases de conception, développement et IVVQ (les jalons J5 et J6 sont confondus). Le jalon J7 marque le passage de la phase de réalisation à celle d'utilisation et fait l'objet du transfert de propriété entre fournisseur et acquéreur.

Dans le cas d'un système à exemplaires multiples, notamment pour des durées de vie longues, chaque exemplaire a ses propres phases de production, d'utilisation et de retrait de service. Vues de l'industriel fournisseur, les activités de production, déploiement, maintien en condition opérationnel et retrait se recouvrent dès lors que les qualifications industrielle et opérationnelle ont été prononcées. Par ailleurs, une phase de pré-industrialisation peut être réalisée pendant la conception préliminaire pour justifier la "fabricabilité" de la conception architecturale et contribuer à la justification des choix d'architecture. Cette éventualité sera d'autant plus affirmée que le système sera développé suivant les principes de l'ingénierie simultanée.

Le recouvrement ou « tuilage » entre phases expose à des risques du fait de l'incomplétude et donc de l'instabilité des « entrées » de la nouvelle phase. Dans le principe, un jalon n'est franchi que si les résultats de la phase qui se termine ont été dûment validés en vue de leur utilisation dans la phase suivante. Ceci est particulièrement critique pour les jalons J3, J5 et J6. Dans le cas contraire, notamment lorsque le tuilage est utilisé pour raccourcir les délais, par exemple en commençant à développer les constituants sans avoir finalisé l'architecture, en lançant un engin spatial incomplètement validé pour bénéficier d'une fenêtre de tir ou en mettant sur le marché, pour s'y placer avant la concurrence, une série avec des impasses sur la qualification industrielle, la décision doit tenir compte de l'estimation du rapport bénéfice attendu versus risque généré.

14.3.3.3 Du cycle de vie aux processus associés

Nous avons noté dès l'abord (voir Figure 22 et Figure 107) que les processus et leurs activités, qui donnent une vision opératoire du projet, étaient exécutés en parallèle, sur les différents éléments du système éventuellement par des acteurs différents et qu'en conséquence ils étaient, dans le principe, orthogonaux aux phases du cycle de vie.

Cette approche avait l'avantage, outre la prise en compte du parallélisme précité (impliquant un affinement progressif, des bouclages selon les remontées d'exigences induites, et la permanence de certaines activités comme la gestion de configuration), de montrer que les processus techniques démarraient en amont de la phase où ils étaient logiquement utilisés : des tâches nécessitant des spécialistes du soutien sont ainsi mises en jeu dès les premières expressions de besoin de disponibilité et de sécurité du système, ainsi que d'intégration dans le soutien existant.

Néanmoins, sur le plan managérial, cette vision a des limites. Certains processus doivent être terminés lors d'un jalon de fin de phase, la phase suivante étant fondée sur leur résultat. Le jalonnement du projet par le cycle de vie permet ainsi de cadrer et discipliner le foisonnement des processus et de leurs activités, de limiter au maximum les bouclages (générateurs de réfections d'autant plus importantes que venant plus tardivement), d'inciter à faire bien du premier coup – voire, quelquefois, de modérer le perfectionnisme des concepteurs ou la volonté d'optimisation permanente des services méthodes industrielles, la sur-qualité étant une non-qualité.

Il y a de ce fait une correspondance manifeste entre les phases du cycle de vie et les processus principaux mis en jeu pendant ces phases. Les processus principaux associés à une phase peuvent avoir débuté avant le début de phase mais doivent être terminés en fin de phase : dans le principe un jalon est un point de non retour (quelquefois nommé « point d'arrêt » ; dans la pratique, tout retour sur le processus nécessité par des évolutions de besoin ou des découvertes de défauts).

La correspondance phase/processus principaux ne fait pas l'objet de consensus strict. Les processus à mettre en œuvre sont décrits dans les normes d'IS (ISO 15288 par exemple), par principe de manière indépendante des cycles de vie. Les phases des cycles de vies sont plutôt décrites dans des normes ou règlements généralement sectoriels de management de programmes ou projets (BNAe RG040 par exemple) plus ou moins indépendamment des processus.

Nous proposons, avec les Figure 118 et Figure 120, une illustration logique de la relation (phases/processus principaux) pour le cycle de vie de la Figure 117, respectivement pour les processus conduisant à la qualification de la définition et pour les processus conduisant aux qualifications industrielles et opérationnelles. Les trois paragraphes suivants explicitent ces figures en mettant en évidence les principaux documents qui résultent de ces processus et servent de base aux décisions de franchissement des jalons. La dénomination de ces documents ainsi que celle des revues est inspirée de celle utilisée en France dans les programmes de systèmes de défense.

Le Choix d'un cycle de vie

Le but du cycle de vie du projet est de jalonner le projet par des points de visibilité et contrôle permettant son management.

Le cycle de vie présenté ci-dessus Figure 117 répond typiquement à ce problème : il appartient au type de cycles de vie dit en cascade, où chaque phase est associée à un processus principal qui est considéré comme terminé lors du franchissement du jalon de fin de phase. Les itérations sont pour l'essentiel inclus dans les phases et le problème majeur est lié au risque d'avoir à revenir sur une phase autrement que pour un simple ajustement.

Le cycle en cascade s'applique bien quand les objectifs sont suffisamment définis et stables, que la phase d'avant projet a fourni une conceptualisation suffisante du système, que les processus sont structurés et documentés...

Pour répondre à des objectifs, des besoins ou des contraintes particulières des projets et systèmes, des approches visant à prévoir et jalonner des itérations peuvent être appliquées à certaines parties du cycle en cascade qui reste néanmoins le cadre de référence. Citons quelques exemples :

☐ Développement en spirale

- Le cycle en spirale est utilisé pour la conceptualisation et la définition des systèmes fortement novateurs et ouverts (par exemple utilisé par la NASA). Il s'agit de faire des itérations d'affinement de conceptualisation et définition en optimisant les choix et minimisant les risques à chaque itération. Chaque tour de spirale comporte quatre étapes : identifier les objectifs et contraintes de l'étape en fonction des besoins et opportunités, évaluer les solutions alternatives, en estimer les risques, choisir une solution. Par principe, cette approche, visant à maîtriser techniquement au mieux les problèmes nouveaux, est difficile à manager : difficile de prévoir le nombre de spires et ses effets en termes de coûts et délais.

☐ Développement évolutif

- Le cycle de développement évolutif consiste à faire des étapes de définition-réalisation successives avec livraison et mise en œuvre des produits obtenus. Chaque nouvelle étape de définition-réalisation bénéficie des retours d'expérience d'utilisation des produits des étapes précédentes. Cette approche permet des livraisons précoces partielles face à des besoins incomplètement définis, des affinements du besoin par retours d'expérience réelles, des détections d'erreur à bas coût, des évolutions tant de besoin que de solution. Elle s'applique bien sur des technologies permettant l'évolution aisée des produits (le logiciel notamment). Elle présente des risques (livraisons partielles mal acceptées, coût des mises à niveau sur les produits des premières étapes...). De plus elle est difficile à planifier (on n'a que peu de visibilité sur les étapes ultérieures qui dépendent des retours d'expérience d'utilisation).

☐ Développement incrémental

- Le besoin est bien défini, mais pour accélérer la mise sur le marché on planifie la mise sur le marché de versions partielles du produit, chaque version apportant, par incrément, un gain en fonctionnalités et capacité par rapport à la précédente. Elle suppose une définition de l'architecture dès le départ afin qu'elle soit apte à supporter les incréments successifs. On bénéficie d'avantages semblables au développement évolutif, mais dans un contexte plus strictement planifié et jalonné.

☐ Développement de lignes de produits

- Ce type de développement peut correspondre à divers contextes : système développé pour un client, puis repris pour être adapté à d'autres clients, système plateforme susceptible de divers types d'adjonction (structure satellitaire accueillant diverses charges utiles), système avec personnalisation pour chaque client (avion de ligne par exemple), système avec de multiples options (automobile par exemple...). De manière générale on aura un projet du cœur du système (ce qui est commun à toutes les variantes) et par exemple des projets spécifiques aux différents variantes qui auront leur propre jalonnement. L'ensemble est coordonné par le management de la ligne de produits.

14.3.3.4 Management des processus d'obtention et justification de la définition

La Figure 118 présente les aspects managériaux des processus techniques conduisant à l'obtention et la qualification de la définition du système.

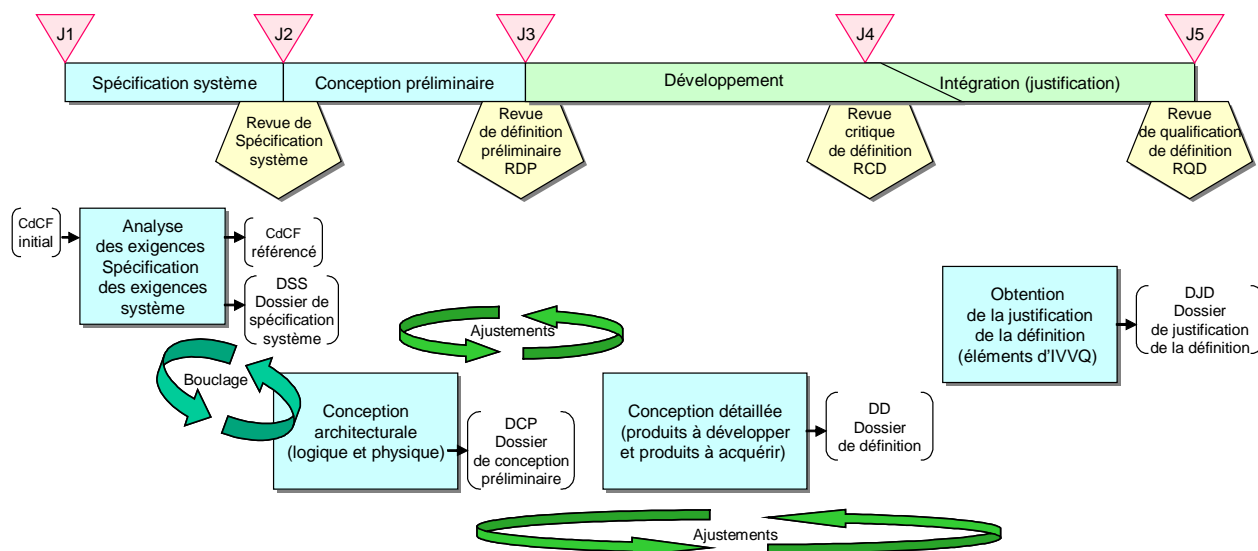


Figure 118 : Les processus d'obtention de la définition et de sa qualification

Les deux premières phases de **spécification système** et **conception préliminaire** correspondent aux processus de la « boucle d'ingénierie » (voir Figure 68) du système.

- ❑ **La phase de spécification système** correspond au processus de spécification des exigences systèmes, précédé d'approfondissement des besoins initiaux (acqureur) et d'analyse des exigences des autres parties prenantes. Elle débouche sur :
 - la formalisation définitive du besoin sous forme du cahier des charges fonctionnel (CdCF) référencé (réajustement du cahier des charges initial, apport de précisions et clarification, hiérarchisation d'exigences),
 - le dossier de spécification du système (DSS) répertoriant les exigences techniques au niveau système (exigences système).

La revue de spécification système préparant la décision de franchissement du jalon J2 à pour but de vérifier la cohérence de ces deux documents avec le CdCF initial et de valider ces documents comme référentiels pour le processus de conception.

- ❑ **La phase de conception préliminaire** correspond aux processus principaux de conception logique et de conception physique, en notant que tous les processus de la boucle d'ingénierie sont mis en œuvre. Elle peut faire évoluer le référentiel des exigences système (ajout d'exigences induites se plaçant au niveau système ou durcissement d'exigences système du fait de choix de conception), mais en principe pas le DSS initial validé par le maître d'ouvrage (ce dernier peut cependant être complété par la liste des éventuelles dérogations dûment acceptées par les deux parties). Elle débouche sur le dossier de conception préliminaire (DCP) définissant l'architecture du système et spécifiant les exigences allouées aux produits (composants et produits contributeurs à réaliser ou acquérir).

La revue de définition préliminaire (RCP) a pour objectif d'évaluer cette phase au vu des éléments de la définition (DCP, DSS, CdCF), notamment de leur cohérence, des résultats de V & V au cours de la phase et des analyses de risques. La décision de franchissement du jalon J3 autorise le lancement de la phase de développement des constituants du système sur la base du dossier de conception préliminaire.

Notons que pour un projet de système complexe se décomposant en sous-projets en fonction de la décomposition du système en blocs constitutifs, on peut être conduit à organiser, en tant que de besoin, des revues de définition préliminaire aux niveaux du système, de ses sous-systèmes (voire à leurs constituants les plus complexes).

- ❑ **La phase de développement** comprend le processus de conception détaillée des constituants qui a pour but de concevoir les produits du système (ou de préparer leur acquisition) de sorte qu'ils répondent aux exigences qui leur sont allouées dans le dossier de conception préliminaire. Ces développements sont suivis par l'ingénierie en vue des ajustements nécessaires et des optimisations. Le dossier de définition récapitule l'ensemble des résultats de conception.

La revue critique de définition (RCD) a pour but de valider le travail de conception ayant conduit au dossier de définition, d'analyser les risques de ne pas obtenir les exigences sur le système une fois réalisé, et, en conséquence de valider le plan d'obtention de la justification de la définition fournissant les preuves que les exigences (CdCF, DSS) pourront effectivement être atteintes lors de la réalisation.

Cette phase de développement inclut la réalisation de constituants en vue de la phase suivante.

- ❑ **La phase d'intégration** (au sens IVVQ) a pour but, dans le contexte d'un système à réaliser en multiples exemplaires, de finaliser la justification de la définition en vue de sa qualification.

Le processus d'obtention de la justification de la définition vise à obtenir les preuves permettant au maître d'œuvre de s'assurer tant de la qualité du système développé que de l'exécution du contrat et de convaincre l'acquéreur que la définition du système répond aux besoins et contraintes qu'il a exprimés et/ou validés. Ces preuves sont récapitulées dans le dossier de justification de la définition (DJD). C'est au vu de ce document que le client prononcera la qualification de la définition (voir Figure 119).

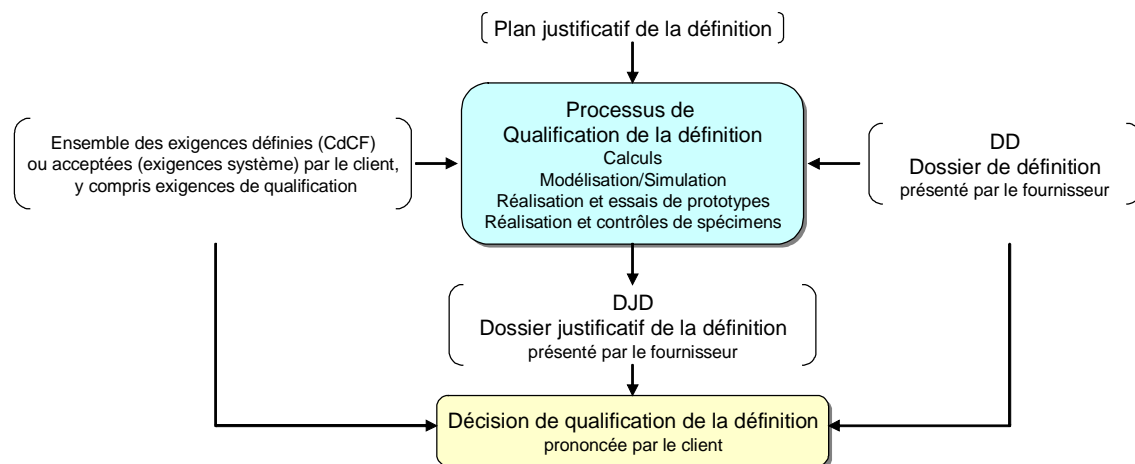


Figure 119 : l'obtention de la qualification de la définition

Notons que le dossier de justification de la définition s'élabore tout au long de la conception, avec les résultats tant des opérations des opérations tant de V & V que d'évaluations d'alternatives et d'optimisations justifiant les choix (ces opérations ayant souvent nécessité non seulement des preuves théoriques, par calcul ou simulation, mais des essais divers sur maquettes, prototypes...).

Il peut arriver que ces justifications établies en cours de conception soient suffisamment probantes et que la qualification puisse être prononcée dès la revue critique de définition.

Dans le cas général d'un système à produire en multiples exemplaires, le processus de qualification de la définition après conception, s'apparente à une phase d'IVVQ, dans laquelle on se limite aux preuves résiduelles effectivement nécessaires pour s'assurer que les exigences seront atteintes, et donc que le processus de production (dont l'industrialisation) peut être lancé sans risque majeur. Ceci peut impliquer de multiples essais en simulation ou sur prototypes préalablement réalisés ou encore sur des assemblages d'éléments réels et d'éléments simulés, voire à l'IVV d'un ou plusieurs prototypes complets

du système. L'élaboration d'un bon plan de justification est primordiale pour garantir le meilleur compromis entre la garantie apportée par les essais (couverture de tests), et le coût budgétaire et temporel des essais;

Dans le cas d'un système unique, la qualification de la définition perd de son sens : elle peut être assimilée soit à une acceptation de la définition suite à la revue critique de définition autorisant le passage à la réalisation du système, soit à l'acceptation du système une fois intégré à partir de ses constituants produits ou acquis.

14.3.3.5 Management des processus de production et qualification industrielle

La Figure 120 présente succinctement les processus de production et transfert vers l'utilisation, conduisant à la qualification industrielle (objet de ce point) et à la qualification opérationnelle du système (objet du point suivant).

L'industrialisation, généralement commencée pendant les phases amont de développement dans le contexte de l'ingénierie dite concourante ou simultanée, définit le processus de production formalisé dans le dossier industriel (DI) également appelé dossier d'approvisionnement, de fabrication et de contrôle (DAFC). Il contient des éléments tels que arborescence de production, conditions et plan d'approvisionnement, gammes de fabrication, plan de contrôle et de test, procédés imposés de fabrication et de validation, etc. De plus l'industrialisation a en charge l'obtention des produits contributeurs à la production tels que les adaptations de l'outil de production préexistant, les machines et outillages spécifiques de fabrication, d'assemblage ou de contrôle, etc.

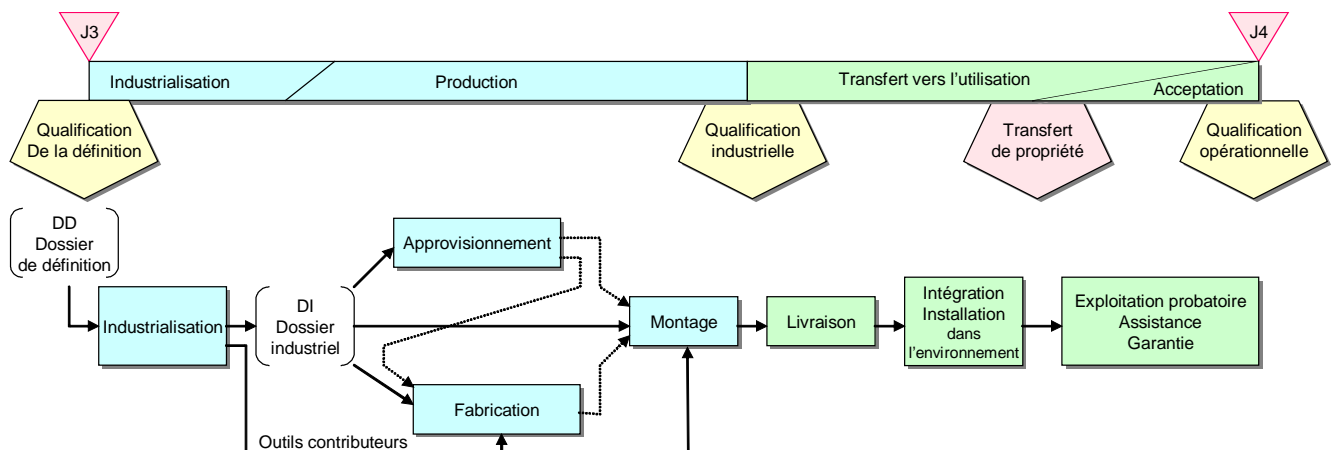


Figure 120 : les processus de production et transfert vers l'utilisation

La validation de l'industrialisation peut porter sur la production du système ou de son premier exemplaire ou peut bénéficier de la fabrication d'un ou plusieurs prototypes éventuellement suivie de celle d'une présérie. Les contrôles et essais satisfaisants sur ces éléments et sur le système de production conduisent à la qualification industrielle, nécessaire pour autoriser le lancement de la production de série.

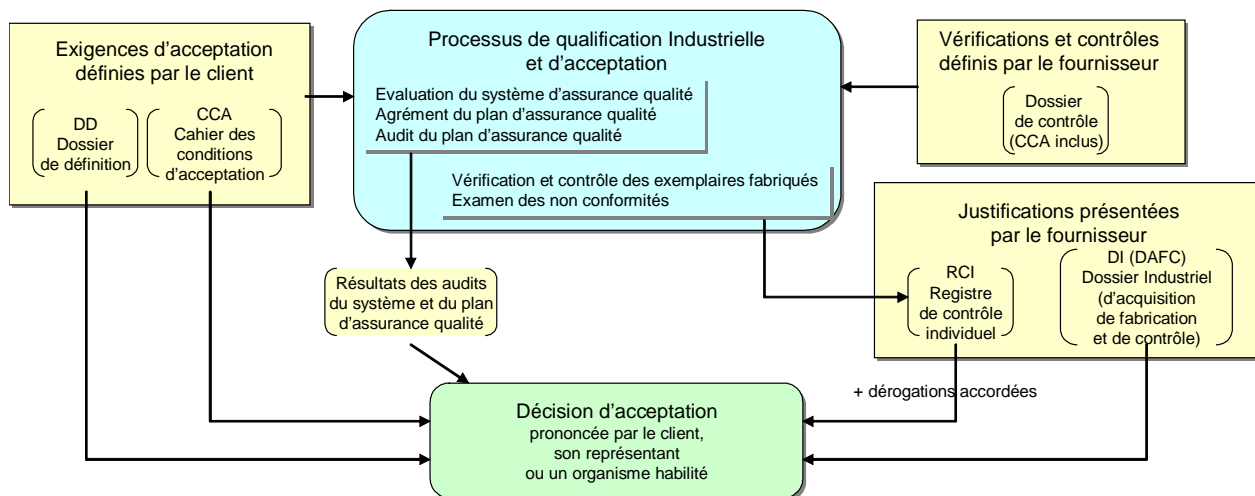


Figure 121 : processus et documents concourant à la qualification industrielle et à la décision d'acceptation

La Figure 121 précise, dans le contexte de notre exemple, le processus de qualification industrielle et les types de documents impliqués. Notons qu'en général, les contrôles jugés nécessaires par le fournisseur ont une couverture plus large que ceux imposés par le client dans le cahier des conditions d'acceptation.

14.3.3.6 Management des processus de transfert vers l'utilisation, d'acceptation et de qualification opérationnelle

Le transfert vers l'utilisation comprend la livraison des produits correspondant au système ou à un de ses exemplaires, impliquant leur conditionnement et leur transport, puis l'installation des produits impliquant leur intégration dans l'environnement d'utilisation et de soutien opérationnel.

C'est en principe sur le premier ou les premiers exemplaires qu'est prononcée l'acceptation du « système » par l'acquéreur ou son représentant, au vu des données de qualification industrielle puis que s'obtient sa qualification opérationnelle.

Les essais conduisant à la qualification opérationnelle sont de deux types :

- ❑ Essais techniques en environnement opérationnel pour montrer que le système reste conforme aux exigences dans des conditions réelles d'emploi. Ces essais sont commencés pendant la production notamment sur des prototypes ou éléments de présérie, par exemple pour apporter la preuve de tenue des marges de sécurité ou de fonctionnement nominal dans des conditions limites d'environnement.
- ❑ Essais opérationnels proprement dits, (quelquefois appelés essais tactiques dans le secteur de la défense), montrant que le système présente les capacités opérationnelles répondant au besoin initial. Ces essais ont souvent été préparés par des essais en environnement simulé.

La qualification opérationnelle prononcée par l'acquéreur, éventuellement complétée par une ou des certifications de conformité à des référentiels de type normatif par des organismes tiers habilités, autorise la mise en exploitation effective du système.

Par la suite, tout exemplaire livré fait l'objet d'une procédure d'acceptation, généralement appelée réception. Elle est souvent décomposée en deux temps :

- ❑ une réception provisoire : elle est prononcée, éventuellement avec réserves, par l'acquéreur (ou son représentant) après vérification d'aptitude du système au bon fonctionnement en environnement réel, incluant la vérification d'aptitude du système de soutien opérationnel. Elle vaut contractuellement transfert de propriété du système et autorise l'utilisation par l'acquéreur,
- ❑ une réception définitive : elle est prononcée par le client après une période probatoire de fonctionnement régulier et la levée des éventuelles réserves faites lors de la réception provisoire. Cette période peut

coincider avec la période de garantie contractuelle au cours de laquelle l'acquéreur bénéficie généralement d'une assistance technique du fournisseur.

Les essais et l'obtention des qualifications dans le cycle de vie du projet

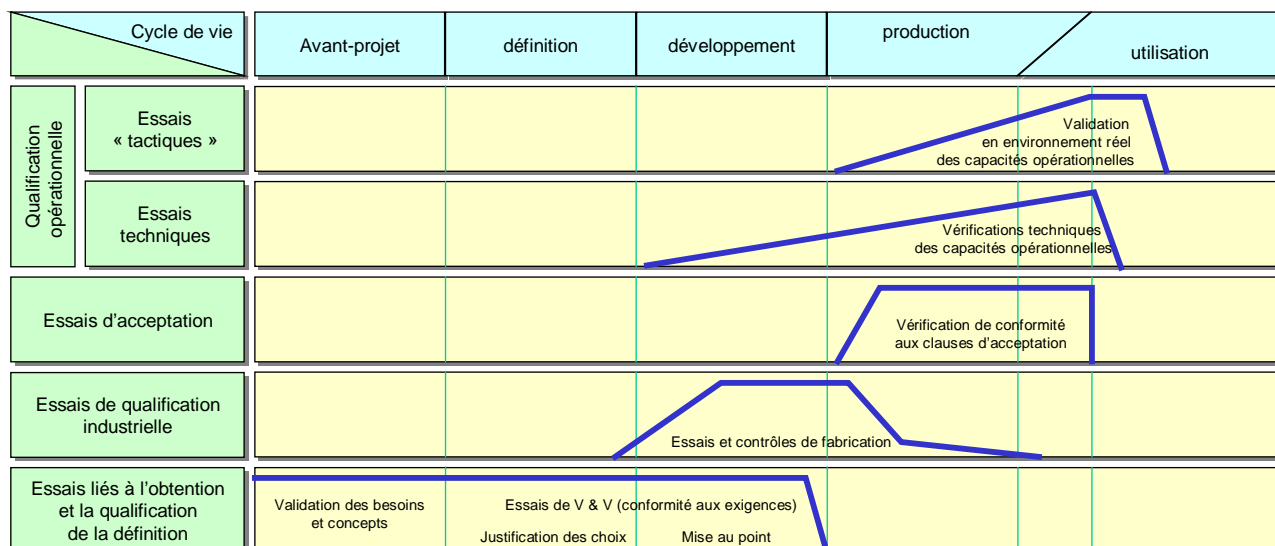


Figure 122 : Les essais conduisant aux qualifications au cours du cycle de vie

L'obtention de la définition et les différents niveaux de qualification supposent la capitalisation de multiples résultats d'essais tout au long du cycle de vie du projet. Leur typologie est schématisée Figure 122.

Ces essais ont globalement pour but :

- ☐ de valider et justifier des choix, depuis les essais sur démonstrateurs permettant de valider des concepts d'opération, des besoins, des faisabilités, jusqu'aux essais de mise au point et validation de choix technologiques et de comparaisons de solutions (analyse système et recherche d'optimisation),
- ☐ de vérifier des conformités à des exigences (référentiels d'exigences applicables, marges de sécurité à respecter, normes applicables...) : essais de V & V liés à la qualification de la définition, puis essais et contrôles de fabrication conduisant à la qualification industrielle qui concourent également à des mises au point, et in fine essais de qualification opérationnelle en environnement réel, éventuellement partiellement simulé, qui valident l'adéquation de la définition aux besoins opérationnels réels.

En termes de management stratégique du projet, la définition d'une stratégie d'essais apportant les assurances nécessaires de qualifications au plus tôt et au moindre coût est un élément majeur de l'économie du projet.

14.3.4 Management de programme et processus d'acquisition

14.3.4.1 Programme et processus d'acquisition d'un système complexe

Un programme est un ensemble coordonné de projets couvrant l'obtention d'un système ou d'un produit complexes répondant à des objectifs globaux définis (partie 1. Chapitre 3). Il peut répondre à deux types de contexte :

- ☐ Pour un maître d'ouvrage (au sens futur utilisateur), un programme apparaît comme une concrétisation du processus d'acquisition des capacités qui sont nécessaires pour satisfaire des options stratégiques définies.

Ce **processus d'acquisition** pris au sens très large, à ne pas confondre avec le processus contractuel d'acquisition mené par un acheteur de système ou sous-système face à un fournisseur (voir 12.2.3.1 de cette 4^{ème} partie), couvre ici l'ensemble des opérations nécessaires à l'obtention de ces capacités sur tout le cycle de vie du ou des systèmes qui les produiront.

Pour un producteur d'énergie électrique, le processus d'acquisition d'une nouvelle capacité de production pour laquelle on aura fait le choix du nucléaire consistera à lancer un programme d'acquisition de centrales nucléaires apte à apporter cette capacité. Le processus d'acquisition comportera la définition du besoin, le management de l'obtention des centrales, des systèmes de soutien (installation, chargement, déchargement, maintenance, approvisionnement dont accès aux services de la chaîne du combustible) et de retrait de service, jusqu'au démantèlement des derniers exemplaires et au stockage des derniers déchets après traitement adéquat.

- ❑ Pour un producteur de produits complexes, un programme est constitué de l'ensemble des projets concourant à la mise sur le marché d'un système ou d'une ligne de produits répondant à des objectifs stratégiques définis.

Pour un producteur de centrales nucléaires, la décision de lancer un nouveau type de centrale répondant à des objectifs stratégiques de compétitivité se traduira dans un programme planifiant les projets nécessaires à la définition et à l'obtention des centrales ainsi que de l'ensemble des produits génériques contribuant à leur commercialisation, leur personnalisation pour les clients, leur installation, leur maintien en condition opérationnelle, leur démantèlement en fin de vie, voire à l'ensemble de la chaîne du combustible associée.

Un programme s'apparente donc à un super-projet, constitué de multiples projets répartis dans le temps et dûment coordonnés. Les concepts de management de projet et notamment de management de l'IS dans le projet s'appliquent au programme. Nous en avons déjà pris en compte la plupart des aspects tant dans les processus d'ingénierie que dans les processus de management. Nous devons néanmoins tenir compte de deux types de particularités :

- ❑ Le programme peut avoir une longue durée de vie : plusieurs décennies pour les systèmes lourds (aéronautique, nucléaire, systèmes d'armes, ferroviaire...) ou même pour des systèmes plus légers du fait de la réutilisation dans des lignes de produit (automobile). Il doit donc faire face à de multiples évolutions que la programmation initiale ne peut prévoir : environnement de l'entreprise, environnement et mission du système, obsolescence technologique, etc.
- ❑ Le programme tant dans son initialisation du fait de son importance que tout au long de son déroulement du fait des évolutions est plus dépendant que le simple projet de la politique de l'entreprise.

Ces deux considérations conduisent

- ❑ d'une part à compléter les niveaux traditionnels de pilotage des projets (voir Figure 23) par les niveaux de pilotage du programme. Ces derniers se placent, à l'évidence, à un niveau plus stratégique que les premiers, donc à un niveau d'invariance temporelle plus élevé (planification plus globale à un horizon à plus long terme),
- ❑ d'autre part à fortement lier le niveau stratégique de pilotage du programme avec le niveau de décision politique de l'entreprise qui le lance.

14.3.4.2 Un modèle à cinq niveaux pour le management des programmes

Nous nous proposons dans ce chapitre d'illustrer cette stratification du management de programme en nous fondant sur un modèle de gouvernance à cinq niveaux de maîtrise, spécifiquement appliqué au processus d'acquisition d'un système par son futur exploitant (voir Figure 123).

Ce modèle, qui sert de base aux travaux du groupe de travail MOA-MOE de l'AFIS, nous semble transposable au cas d'un producteur de système complexe. Dans la description qui suit, nous tentons de l'extrapoler à la problématique générale du management de programme (acquisition d'un système pour l'exploiter ou fourniture d'un système, développement de produits complexes pour les commercialiser).

14.3.4.2.1 Présentation du modèle à 5 niveaux appliqué au processus d'acquisition

La Figure 123 présente le modèle à 5 niveaux de maîtrise du processus d'acquisition d'un système.

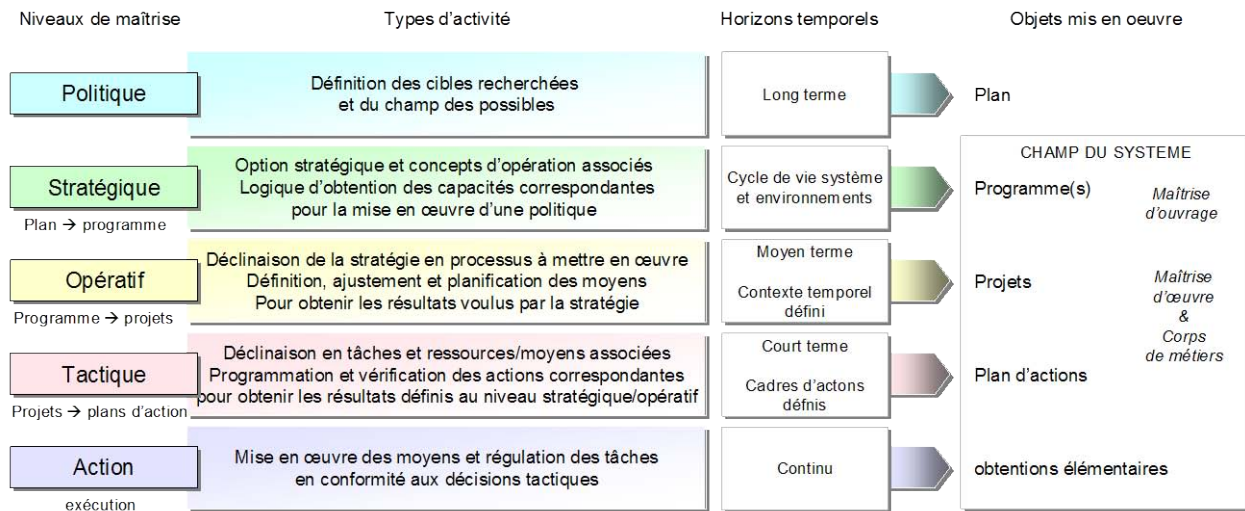


Figure 123 : Niveaux de maîtrise d'un programme (dans le contexte du processus d'acquisition)

Ces niveaux sont présentés ci-dessous en illustrant les premiers sur un exemple d'acquisition d'un système de transport urbain.

14.3.4.2.1.1.1 Le niveau politique

C'est au **niveau politique** que s'élaborent le tout premier cadrage du système dans une vision dynamique à long terme ainsi qu'au fil du temps les réorientations éventuelles de ses objectifs.

Le processus politique formule la raison d'être d'un futur système à exploiter (ou d'un futur produit à commercialiser) à travers sa finalité pour l'entreprise ou la communauté considérée dans un environnement évolutif donné.

Exemple : définition des buts politiques en terme d'aménagement d'un territoire pour la communauté urbaine et de stratégie d'entreprise pour l'organisme de transport.

Son produit est un **plan** ordonnant les cibles à atteindre (effets recherchés) et définissant les contours de leur contexte d'extension (dont le champ des possibles).

14.3.4.2.1.1.2 Le niveau stratégique

C'est au **niveau stratégique** que se décide, s'élabore et se maîtrise le programme (ou les programmes) visant à l'obtention de capacités pour mettre en œuvre la politique, cela dans une vision tournée vers le besoin et la maîtrise globale du système.

Le processus stratégique fondé sur une première passe d'ingénierie du système dans une vision orientée besoins, choisit une option dans le champ des possibles, décline les cibles politiques en concepts opérationnels, spécifiant les capacités à atteindre et définissant les limites et la composition du système et de ses environnements contributeurs (vision cycle de vie système et scénarios d'évolution).

Exemple : déclinaison des buts de la politique d'aménagement du territoire en stratégie de transports publics et en programme (prolongement de lignes, création de lignes nouvelles, ou développement de nouveaux modes de transport).

Le produit de ce processus est un **programme** qui définit un ensemble cohérent et ordonné d'éléments à acquérir (cas d'un acquéreur de système) ou à développer (cas d'un producteur) ainsi que le suivi de ce programme.

14.3.4.2.1.1.3 Le niveau opératif

Le **niveau opératif** décline les objectifs stratégiques du programme en processus à mettre en œuvre pour les obtenir dans un cadre espace/temps donné (moyen terme).

Le processus opératif, fondé sur une deuxième passe d'ingénierie système dans une vision plus orientée résolution de problème, définit les concepts et la logique d'obtention des éléments objets du programme, définissant les processus, démarches et moyens, décomposant le programme en projets coordonnés dans le contexte d'une recherche de cohérence et d'économie globale.

Exemple : pour un programme de prolongement de ligne de transport public, processus et projets à mettre en œuvre pour l'obtention des agréments, la réalisation des infrastructures, l'acquisition des équipements, la mise en place ou l'adaptation du soutien en vue de la mise en service à une date donnée.

Le résultat de ce processus est une planification et un suivi du programme décomposé en **projets** majeurs : définition et planification des opérations permettant d'assurer les objectifs stratégiques d'acquisition (cas d'un acquéreur de système) ou de développement (cas d'un producteur).

14.3.4.2.1.1.4 Le niveau tactique

Le **niveau tactique** correspond au management des projets du programme.

Les processus tactiques, fondés sur l'ingénierie système des objets des projets du programme (systèmes, sous-systèmes, produits ou services), planifient les projets (tâches planifiées avec ressources et moyens), lancent les plans d'action correspondants à chaque projet et évaluent leurs réalisations (revues) en garantissant les cohérences.

Son résultat est constitué des plans d'actions pour réaliser effectivement les acquisitions élémentaires objets des projets (cas d'un acquéreur de système) ou les développements ou acquisitions (cas d'un producteur).

14.3.4.2.1.1.5 Le niveau action

Le **niveau action** est celui de la réalisation des actions (tâches) définies dans chaque plan d'action, C'est le niveau le plus élémentaire vu du programme.

Il assure la fourniture des éléments objet du programme (cas de l'acquéreur) ou le développement ou l'acquisition des éléments du programme (cas du producteur). Rappelons que ces éléments sont des éléments du système ou des systèmes contributeurs.

14.3.4.2.2 Modèle à 5 niveaux et organisation industrielle

Généralement ces 5 niveaux de processus se répartissent sur des organisations complexes :

Exemple : les opérateurs nationaux de production d'énergie électrique et des consortiums d'entreprises produisant des centrales nucléaires et/ou traitant de la chaîne du combustible, avec les interactions entre leurs programmes respectifs d'acquéreur ou de fournisseurs de produits et services en sont des exemples.

Voici quelques remarques sur cette répartition utiles à la compréhension du modèle

- ☐ Les **décisions politiques** peuvent être externes à l'organisme qui exploitera le système objet du programme (des organismes étatiques face à des opérateurs nationaux).
- ☐ Schématiquement, les **niveaux stratégique et opératif** correspondent respectivement aux visions du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre sur le programme : l'opératif est une déclinaison du stratégique

dans une boucle de type spécification/conception, garantissant ainsi la cohérence d'ensemble des projets menés au niveau tactique avec la stratégie.

Cela s'applique aussi bien dans le contexte du processus d'acquisition par un opérateur où maître d'ouvrage et maître d'œuvres sont généralement des entités juridiques séparées, que dans le contexte du développement d'un produit complexe où maître d'ouvrage et maître d'œuvre peuvent appartenir à la même entité juridique.

- ❑ Les niveaux **tactique et action** s'apparentent respectivement aux aspects management et exécution des projets du programme.

Au niveau du management de programme, il s'agit de valider les plans d'action, d'être informé de l'avancement des actions, et de vérifier leurs résultats (généralement dans le cadre de revues) : à ce titre le management du programme participe au management que nous avons appelé stratégique pour le projet (voir Figure 23 et Figure 109).

14.3.4.3 Mise en œuvre du modèle à 5 niveaux de management de programme

Les causes des défauts de maîtrise du processus d'acquisition peuvent trouver leur origine :

- ❑ Soit au sein des processus spécifiques du niveau considéré :

Ainsi, par exemple, au niveau stratégique, une vue restrictive du champ des possibles limitera la capacité de faire face à toutes les situations opérationnelles. Au niveau opératif, la mauvaise prise en compte des interactions du système avec les autres systèmes concourants ne permet pas d'assurer la cohérence avec leurs propres processus d'acquisition (cas de l'inadéquation de l'infrastructure dans le ferroutage, par exemple).

- ❑ Soit, vu du niveau considéré, au sein des processus de niveau supérieur ou inférieur : elles peuvent certes être liées à un déficit de maîtrise de ces autres processus, mais aussi à un manque de cohérence et d'optimisation entre les différents niveaux en jeu.

Ainsi, par exemple, entre les niveaux opératif et tactique : des modifications des spécifications et/ou de l'architecture lors des phases de conception/développement des constituants peuvent entraîner des dérives par rapport aux coûts objectifs d'acquisition et d'utilisation ; les choix d'architecture initiaux peuvent s'avérer inappropriés pour la prise en compte des évolutions technologiques (absence d'interfaces standardisées, de marge dimensionnelle, de réserve de capacité...).

On en déduit la nécessité d'interactions permanentes entre niveaux. En particulier deux considérations paraissent essentielles à la réussite des programmes :

- ❑ Les processus politiques et stratégiques assurent la maîtrise globale tant de la cohérence des objectifs que de leur ajustement aux évolutions de l'environnement : ils doivent rester permanents pendant toute la vie du programme.
- ❑ Une forte imbrication de certains processus contribue à l'optimisation globale : l'interactivité des processus politiques et stratégiques garantit leur cohérence et leur adaptation permanente aux évolutions tant de l'environnement que du champs des possibles ; celle des processus opératifs et tactiques permet l'optimisation permanente moyens/objectifs.

Ceci met en évidence l'importance des « boucles politico-stratégique » d'optimisation plan-programme et « tactico-opérative » d'optimisation programme-projets (voir Figure 124), l'opératif apparaissant comme la mise en œuvre directe du niveau stratégique.

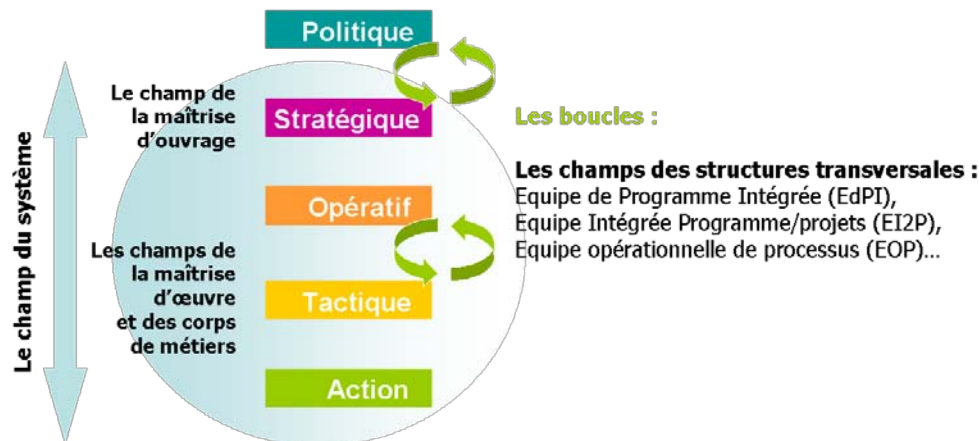


Figure 124 : Boucles politico-stratégiques et tactico-opératives

De nombreuses dérives de programmes résultent de l'instabilité des choix de niveaux politique et stratégique qui se traduit soit en réorientations multiples soit, au contraire, en absence de décision. Or, l'évolution des environnements et des exigences est partie intégrante de tout processus d'acquisition de système complexe, et l'imprédictibilité de certaines évolutions constitue une caractéristique majeure de complexité.

L'évolution des exigences n'est donc pas un défaut en soi ; c'est sa non-anticipation et l'absence de management des risques associés qui en est un. La prise en compte des évolutions relève, quant à elle, de l'efficacité des processus et des acteurs au niveau considéré et entre niveaux.

Les niveaux politique et stratégique relèvent tous deux de logiques systémique et prospective, sur des champs espace/temps à la fois différents et interagissant. D'où la nécessité, dans des situations fortement évolutives, de considérer une « boucle », dite boucle politico-stratégique, de mises en cohérence et d'optimisation entre ces niveaux (plan et programme) : maîtrise des champs des contraintes et des possibles, anticipation des scénarios d'environnements, ajustement entre le but politique et les programmes.

La même approche peut être menée pour les niveaux opératif et tactique : la boucle tactico-opérative (programme et projets) a alors pour logique d'adapter de manière coordonnée et dans un tempo rapide (réactivité, agilité), les moyens et plans d'actions en regard des résultats effectifs des actions, de la réalité des situations opérationnelles, mais aussi des évolutions éventuelles des objectifs stratégiques.

Ces deux boucles nécessitent, entre les deux niveaux concernés, des processus de négociation pour l'adaptation continue des objectifs et actions aux évolutions et des processus de décision communs pour le management des risques et opportunités.

14.4 Le management de l'IS dans l'entreprise

Un bon management de l'IS dans chaque projet, implique un management de l'IS dans l'entreprise qui les mène. En effet :

- ☐ Les décisions concernant les projets (choix de projets, choix d'investissement sur les lignes de produits) doivent être cohérentes avec la stratégie de l'entreprise.
- ☐ L'application de l'IS dans les différents projets doit être homogène ou coordonnée afin de faciliter les passages du personnel entre projets.
- ☐ Les investissements dans les compétences, ressources et moyens nécessaires à l'ingénierie système doivent être analysés et optimisés au niveau de l'entreprise en fonction de sa stratégie et d'une vision globale concernant les besoins des projets actuels et prévisibles.
- ☐ Les ressources et moyens disponibles doivent être partagés au mieux entre les projets. Cette optimisation d'emploi des ressources doit être managée de façon continue.

- ☐ Le retour d'expérience des différents projets doit être capitalisé.

C'est le rôle des processus dits processus d'entreprise succinctement présentés au paragraphe 12.2.4 de cette partie d'assurer ce management global de l'ingénierie système dans l'entreprise.

Reste que l'IS ne se met pas en place dans l'entreprise du jour au lendemain. Le déploiement de l'IS consiste à mettre en place les processus d'IS et à les améliorer dans le but d'améliorer l'efficacité des activités et, en conséquence, contribuer à améliorer la compétitivité de l'entreprise.

Toute mise en place ou amélioration de processus implique la maîtrise du changement correspondant. Cette maîtrise repose sur trois piliers :

- ☐ La mise en place, au niveau de l'entreprise, d'un processus d'ingénierie des processus. Ce processus est chargé de définir les processus à institutionnaliser en fonction des besoins de l'entreprise et de les améliorer en fonction des retours d'expérience, d'analyse de positionnement (*benchmarking*), de résultats de veille technologique, etc.
- ☐ Pour l'opération de déploiement proprement dite, la mise en place de projets de déploiement ou de progression. Ces projets impliquent l'évaluation de l'état initial, la définition de l'objectif de progression, la planification et la maîtrise du projet de progression, l'évaluation du résultat,
- ☐ Au niveau normatif, l'utilisation de modèles de maturité. Ces modèles fournissent une échelle générique de maturité des processus et un modèle d'évaluation proposant les critères de positionnement par rapport à cette échelle.

14.4.1 Les processus d'entreprise supports de l'IS

14.4.1.1 Caractérisation des processus d'entreprise

Au chapitre 12.2.4, nous avons classé les processus d'entreprise en deux catégories (voir Figure 67).

- ☐ aide au pilotage stratégique de l'entreprise
- ☐ développement et partage des ressources et moyens communs d'IS pour bien réaliser les projets

Les processus de management de l'environnement de l'entreprise et de management des investissements dans les programmes de l'entreprise qui font partie de la première catégorie, apparaissent essentiellement comme des supports aux stratégies marketing, commerciales et financières de l'entreprise. Nous ne les détaillerons pas ici d'autant qu'ils sont fortement dépendants du type d'entreprise et que les problématiques diffèrent :

- ☐ pour une entreprise maître d'ouvrage exploitante de systèmes (producteur d'électricité, opérateur de télécommunication, transporteur ferroviaire ou aérien) qui a une responsabilité de management de l'acquisition de systèmes (ce point est traité en 14.3.4),
- ☐ pour une entreprise maître d'œuvre au sens « ensemblier » de systèmes spécifiques à façon (ingénierie de système spatiaux, de systèmes de télécommunication, de systèmes d'armes) qui a une politique de types de systèmes et de management de sous-traitants, ainsi qu'éventuellement des lignes de produits constituants de tels systèmes en propre,
- ☐ pour une entreprise de produits standard ou personnalisables (fabricants de chaudières nucléaires, de lanceurs spatiaux, industriels de télécommunication, constructeur ferroviaire ou avionneur) ou d'équipements complexes (fabricant de moteurs pour l'aéronautique, l'espace, la marine) qui a une politique de lignes de produits avec une part d'ingénierie d'adaptation et/ou d'installation,
- ☐ pour un producteur de produits grande diffusion (automobile, télécommunication grand public) qui a un problème de stratégie de lignes de produits et de réseau de distribution/maintenance.

A l'opposé, certains de ces processus ont des caractéristiques nettement plus techniques : ce sont les processus orientés vers le support de l'IS et des projets dans l'entreprise, ainsi que, au moins partiellement, le processus de management de l'innovation dans les types de projet ou les lignes de produits, qui tout en contribuant à la stratégie produit générale fait typiquement partie des activités techniques du ressort de l'IS.

De plus ces processus sont relativement indépendants du type d'entreprise (même si le contenu technique des activités génériques qui les sous-tendent peut différer en fonction de la typologie).

La Figure 125 (inspirée des divers normes et modèles de maturité en IS) rappelle la cartographie des processus d'entreprise et donne une présentation schématique des principales activités et bonnes pratiques des processus de management et support technique de l'IS au niveau de l'entreprise.

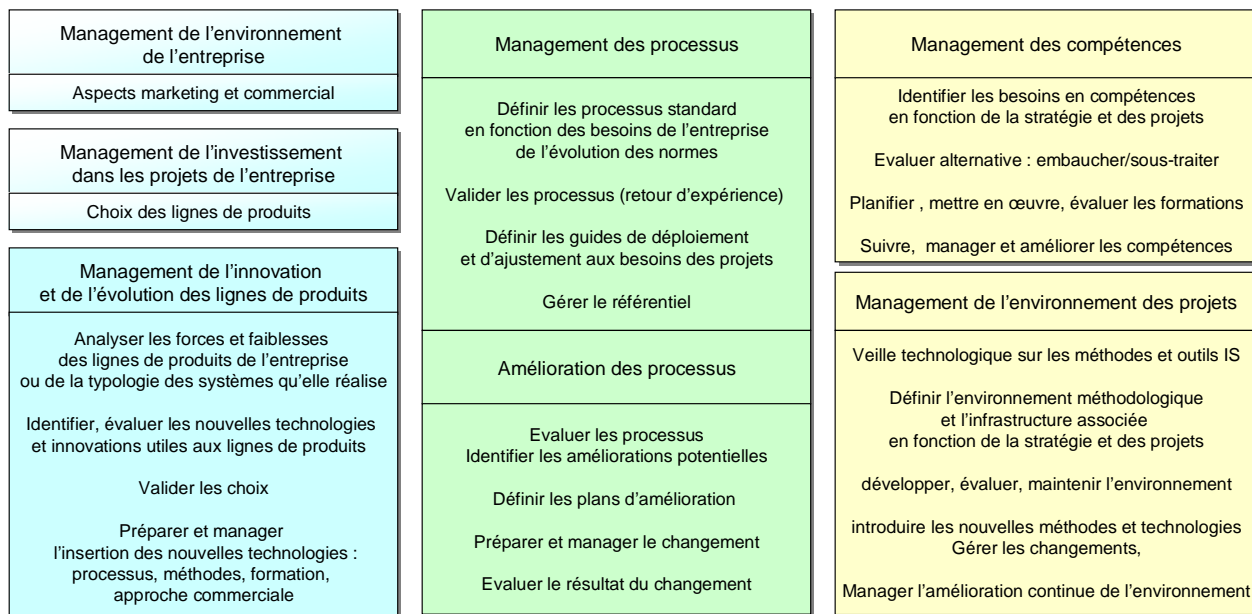


Figure 125 : Eléments de management du support de l'IS dans l'entreprise

14.4.1.2 Impacts des processus d'entreprise sur le déploiement de l'IS

Le déploiement de l'ingénierie système dans l'entreprise s'appuie sur les processus de management et support technique de l'IS.

Le processus de management des processus y est central : c'est lui qui fait l'ingénierie des processus génériques à institutionnaliser et déployer, qui en définit les guides de déploiement et d'utilisation, qui en évalue l'efficacité par retour d'expérience des différents projets et qui les améliore en conséquence.

Reste que le déploiement et l'amélioration des processus n'a de sens que si on dispose des outils méthodologiques et des infrastructures associées pour en supporter les activités ainsi que des compétences pour les mettre en œuvre : c'est le rôle des processus de management des compétences et de management de l'environnement des projets.

Enfin si dans chaque projet, l'IS vise à optimiser le système cible du projet, c'est à un niveau plus global que doivent être optimisées les lignes de produits ou les types de système que développe l'entreprise : c'est, en plus de sa fonction stratégique, le rôle du processus de management de l'innovation et de l'évolution des lignes de produits, très lié aux précédents.

La structure de l'entreprise peut plus ou moins favoriser la mise en œuvre de ces processus d'entreprise. Une structure matricielle croisant des entités lignes de produit ou types de système auxquelles sont rattachés les projets avec les entités métiers ou spécialités peut favoriser tant l'innovation et l'amélioration des compétences fonctionnelles des lignes de produit et sectorielle des types de systèmes que la capitalisation des méthodes et compétences techniques ainsi que la réutilisation par métier et spécialité (voir Figure 126). Les projets utilisent les entités métiers, soit par délégation d'experts métiers dans leurs équipes intégrées d'ingénierie ou d'analyse système, soit par « sous-traitance » de sous-projets concernant principalement un métier.

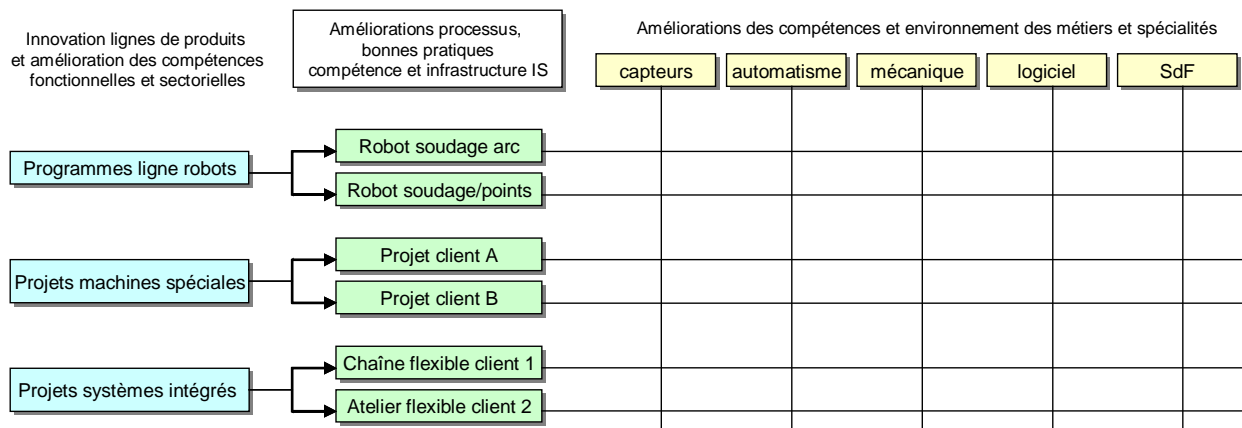


Figure 126 : Exemple d'organisation matricielle

14.4.2 Déploiement de l'IS dans l'entreprise

14.4.2.1 Les bases du déploiement

Le déploiement de l'IS dans l'entreprise consiste, d'une part, à améliorer l'approche du métier, par la mise place, puis l'amélioration des processus adaptés aux besoins de l'entreprise, ainsi que, d'autre part, à manager le changement pour que leur mise en œuvre soit effective dans les différents projets.

Le déploiement de l'IS nécessite de définir tant les métiers et les spécialités qui mettront en œuvre les processus, que les bonnes pratiques, méthodes et outils nécessaires à la réalisation des activités des processus, ainsi que les niveaux de compétences aptes à réaliser ces activités et les plans de formation associés.

A ce titre il implique la mise en œuvre de l'ensemble des processus d'entreprise, processus de support des activités techniques d'IS, dont, à l'évidence, le processus de management et amélioration des processus, mais aussi les processus stratégiques. Le déploiement et la définition des processus qui en sont l'objet doivent, en effet, rester ajustés à la politique et aux besoins de l'entreprise.

De plus, à l'instar de toute opération qualité, le déploiement de l'IS nécessite une forte implication du management.

Les principales activités de support de la démarche d'IS, à déployer en priorité, sont :

- ☐ tracer les exigences,
- ☐ justifier les choix, vérifier et valider tout résultat,
- ☐ sensibiliser l'équipe intégrée d'IS à la transversalité et à la simultanéité des travaux, etc.

On constate que les premiers processus effectivement déployés sont généralement :

- ☐ l'ingénierie des exigences qui est au cœur des processus techniques d'ingénierie d'un système pour sa définition, sa vérification, son évolution,
- ☐ la gestion de configuration qui garantit l'intégrité de la définition du système de la maîtrise de ses évolutions tout au long du développement et de l'exploitation.

Ces deux processus fournissent les référentiels essentiels au développement du système et sont structurants pour le déploiement progressif des autres processus techniques, notamment les processus de conception et d'intégration ainsi que les processus de V & V.

Parallèlement, les processus de management sont également améliorés tant au niveau des projets (pratique des équipes intégrées d'IS, des revues de projet par des équipes de pairs, etc.) qu'au niveau entreprise, (management des compétences, management des processus institutionnalisés, etc.).

14.4.2.2 La stratégie de déploiement

Le déploiement ne s'arrête pas à la mise en place des premiers processus : de nouveaux processus et de nouvelles activités peuvent être déployés tandis que des pratiques des activités déjà en place peuvent être améliorées.

Le déploiement de l'IS est ainsi une œuvre qui s'inscrit dans la durée, en suivant une démarche globale de progression cohérente avec la politique de l'entreprise, dans laquelle s'insèrent des actions de progression.

La **stratégie de déploiement** est élaborée dans le cadre de la politique de l'entreprise avec un objectif évident d'amélioration de productivité dans le métier de l'IS. Elle est modulée en fonction de multiples critères internes et externes (culture d'entreprise, contexte organisationnel, climat social... mais aussi évolution de l'état de l'art et de l'environnement concurrentiel et normatif) et est recadrée en fonction des résultats des actions de progression et des nouvelles attentes des acteurs moteurs du déploiement.

Généralement opportuniste au départ et souvent fondée sur une appréciation des forces et faiblesses, la stratégie de déploiement est ensuite disciplinée par les exigences du modèle de maturité qu'elle choisit.

La stratégie de déploiement est mise en œuvre par des **actions de progression** successives..

14.4.2.3 L'action de progression

Toute action de progression (ou action de progrès) implique la mise en place d'un projet transversal par rapport aux projets et activités contribuant directement aux affaires.

Réussir une action de progression

La difficulté majeure provient de ce que l'ensemble des projets de l'entreprise est concerné par une action de progression et que cette dernière peut leur paraître, au moins sur le court terme, plus perturbatrice que bénéfique.

Il est donc nécessaire de mettre en place les conditions de réussite aptes à conduire à un retour sur investissement significatif. Elles sont multiples : une forte implication de la hiérarchie, des objectifs de progrès partagés par tous, la mise en place effective des ressources nécessaires ainsi que la formation d'une équipe crédible chargée du projet d'évolution et soutenue par des relais porteurs du changement dans les unités de l'entreprise concernées ...

Dans le cadre de la stratégie de déploiement de l'IS, toute action de progression consiste à évaluer la situation de départ, à en déduire des objectifs de progression, à planifier, exécuter et maîtriser le projet de progression, enfin à évaluer la situation alors acquise en définissant les actions pour maintenir cet acquis (Figure 127) :

- ☐ Evaluation la situation de départ
 - Evaluer l'état ou la maturité des processus, en s'aidant du modèle d'évaluation du modèle de maturité choisi.
- ☐ Définition des objectifs à atteindre par l'action de progression
 - Identifier, à partir de cette évaluation, les axes prioritaires progression en s'aidant de l'échelle de progression du modèle de maturité ; déterminer les objectifs à atteindre sur la base d'un calcul simple de retour sur investissement.
- ☐ Planification du projet de progression
 - Définir en partant des pratiques existantes un plan de progression répondant à ces objectifs, estimer les risques, définir leurs parades, estimer les ressources (coûts, durée...), définir les

indicateurs de progrès à suivre et leur valeur cible, planifier les actions de progrès et les parades aux risques.

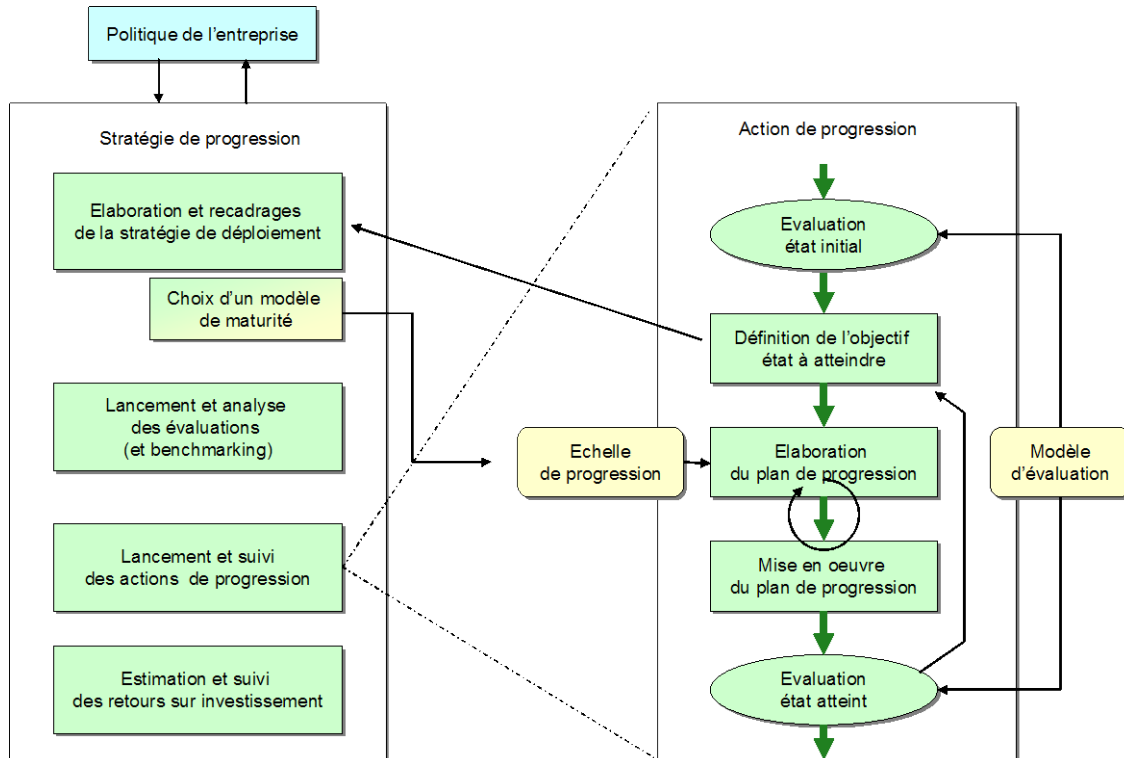


Figure 127 : Stratégie de déploiement et action de progression

- ❑ Réalisation et maîtrise du projet de progression
 - Mettre en œuvre le plan de progression en le confiant à une équipe motivée comprenant des relais dans les entités concernées, sous l'égide d'un chef de projet rapportant à la direction.
 - Mesurer le progrès réalisé, réagir aux écarts par rapport au plan de progression, proposer des améliorations, revoir les objectifs ou réorienter le projet si nécessaire.
- ❑ Evaluation de la situation finale atteinte
 - Evaluer les résultats de l'action de progression en terme d'acquisition des bonnes pratiques à l'aide du modèle d'évaluation, valider l'acquis et définir les actions de maintien de l'acquis.
 - Mesurer les effets du projet de progression en termes d'efficacité et de rendement des processus, ainsi que de retour sur investissement selon des modèles de plus en plus représentatifs au fur et à mesure du déploiement.

La stratégie de déploiement est alors recadrée en fonction des résultats et des nouvelles attentes des acteurs moteurs du déploiement.

14.4.3 Modèles de maturité

Issus de recherches sur l'amélioration de la production du logiciel chez IBM dans les années 80, les modèles de maturité (*Capability maturity model*) apparaissent aujourd'hui comme des standards de mise en œuvre progressive de la qualité appliqués à un métier particulier.

Ils fournissent un référentiel pour évaluer la capacité d'un organisme à maîtriser et améliorer les processus d'un métier. A titre d'exemple, le modèle CMMI, le plus utilisé aujourd'hui en IS, est construit à partir de trois

modèles : SE-CMM, pour la maîtrise de l'IS proprement dite, SW-CMM pour celle du logiciel et IPD-CMM pour celle de l'ingénierie intégrée des produits.

Les modèles de maturité fournissent une échelle de maturité et un modèle d'évaluation permettant à l'organisme de se positionner par rapport à cette échelle.

Contrairement à la certification qualité ISO-9001 où un organisme certificateur garantit que l'entreprise s'est organisée pour mettre effectivement en œuvre les processus qu'elle a définis, l'utilisation des modèles de maturité spécifiques à un métier permet à l'entreprise :

- ☐ de définir ses plans d'acquisition de bonnes pratiques et de progression dans ces pratiques, et d'évaluer les résultats obtenus dans le métier après mise en œuvre du plan,
- ☐ de s'auto-évaluer dans un métier donné par rapport à une échelle de maturité standard, et donc de se comparer aux entreprises exerçant le même métier.

L'expérience montre que toute progression en maturité en IS (acquisition de bonnes pratiques, progression dans la maîtrise des processus) se traduit globalement par un retour sur investissement significatif et des améliorations très sensibles d'indicateurs globaux : diminution conséquente des taux de dépassement de coûts ou de délais sur les projets, des taux de réfection, etc.

14.4.3.1 L'échelle générique de maturité

Tous les modèles de maturité sont fondés sur une échelle générique d'amélioration des processus, provenant du constat que toutes les entreprises passent par les mêmes étapes pour maîtriser un processus.

On peut présenter cette échelle en partant de l'objectif ultime de la progression qui consiste à améliorer continûment l'aptitude à réaliser le processus. On constate alors :

- ☐ qu'on ne peut améliorer que ce qu'on sait mesurer (sinon comment identifier ce qui est à améliorer et vérifier l'effet positif ou négatif de l'opération ?),
- ☐ qu'on ne peut mesurer que ce que l'on a défini (une mesure n'est valide que si elle porte sur des éléments répétitifs permettant la comparaison sur des projets différents),
- ☐ qu'on ne peut définir que ce qu'on sait gérer (formaliser des processus que l'on ne sait pas gérer conduirait à pérenniser des mauvaises pratiques),
- ☐ et qu'on ne peut utilement gérer que ce que l'on sait faire.

On en déduit une échelle à 5 degrés de maîtrise d'un processus à partir du degré 0 initial (voir Figure 128):

- ☐ 1 – *Informel (savoir-faire les activités)*. Le processus est effectivement exécuté dans les projets : il existe des résultats tangibles montrant que les pratiques spécifiques du processus (le savoir-faire des activités) sont acquises,
- ☐ 2 – *Géré (planifié et suivi)*. Le processus est géré pour chacun des projets : il est planifié et le déroulement du plan est suivi. Ceci confère un certain niveau d'efficacité aux projets,
- ☐ 3 – *Standardisé (Défini et ajusté)*. Le processus est défini (institutionnalisé) au niveau de l'entreprise et ajusté au besoin de chaque projet : il existe un standard interne ajustable effectivement mis en œuvre avec collecte du retour d'expérience. Ceci confère un certain niveau de reproductibilité et l'aptitude à l'outillage et à la réutilisation, le processus étant répétitif,
- ☐ 4 – *maîtrisé (mesuré et évalué)*. Le processus est doté d'indicateurs d'efficacité et de rendement objectifs (permettant la comparaison entre projets) : ses performances sont mesurées et donnent lieu à évaluation et réaction. Ceci permet la validation du processus standard et confère une certaine prédictibilité aux projets nouveaux,
- ☐ 5 – *Amélioré en continu (optimisé en maîtrisant le changement)*. Le processus est continûment amélioré et le changement dans l'entreprise induit par les améliorations est maîtrisé. Ceci confère l'aptitude à la réactivité aux évolutions d'environnement (marché, technologie, concurrence...) sans régression en qualité.

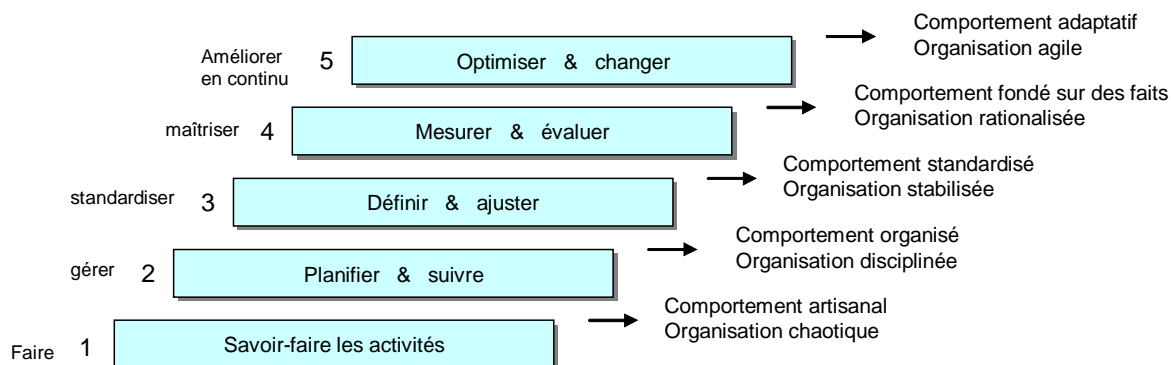


Figure 128 : L'échelle générique de maturité d'un processus

Ce modèle sous-tend un cheminement logique pour progresser en efficacité et rentabilité dans le métier. Il est fondé sur un ordonnancement des actions de progrès concernant les trois classes de processus (processus d'ingénierie (techniques), processus de management de projet, processus d'entreprise) dont voici les étapes initiales :

- ☐ La première étape consiste évidemment à acquérir les savoir-faire techniques : les processus d'ingénierie doivent être au niveau 1.
- ☐ Le passage au niveau 2 de maîtrise des processus d'ingénierie implique qu'ils soient dûment planifiés et suivis : les processus de management de projet doivent donc avoir au moins atteint le niveau 1.
- ☐ Le passage au niveau 3 de maîtrise des processus d'ingénierie implique que ces processus soient définis au niveau de l'entreprise et ajustés à chaque projet : pour garantir leur définition, les processus d'entreprise (notamment le management des processus) doivent jouer leur rôle, donc avoir au moins atteint le niveau 1, tandis que pour garantir leur ajustement et leur application dans les projets, les processus de management doivent être eux-mêmes planifiés et suivis donc avoir au minimum atteint le niveau 2. Dans les faits, l'expérience montre que le management de projet doit progresser en même temps et au même niveau que l'IS au risque d'annihiler les bénéfices de la progression de celle-ci.

14.4.3.2 Le modèle d'évaluation/progression

Si les normes décrivent les processus par leurs *activités*, les modèles d'évaluation préfèrent les évaluer à travers des *pratiques* au sens de la *bonne pratique* (bonne façon de faire les activités). A titre d'exemple le tableau suivant illustre les bonnes pratiques spécifiques du processus d'intégration des disciplines :

Bonnes pratiques en intégration des disciplines (selon SE-CMM)
<ul style="list-style-type: none"> – Identification des disciplines directement ou indirectement nécessaires au développement du système, – Familiarisation des équipes du projet à l'interdisciplinarité et aux rôles respectifs des représentants des différentes disciplines, – Promotion active de la transversalité dans les équipes du projet, – Etablissement des méthodes de coordination interdisciplinaire, – Etablissement de méthodes d'identification et de résolution de problèmes interdisciplinaires, – Communication des résultats d'activités pluridisciplinaires aux équipes et acteurs concernés, – Développement d'une appréhension commune des objectifs du projet.

Les pratiques spécifiques d'un processus sont évaluées en référence aux pratiques génériques correspondant aux degrés de l'échelle de maturité. Ainsi, si toutes ses pratiques spécifiques du processus font l'objet d'une définition au niveau de l'entreprise et sont effectivement mises en œuvre dans les projets après ajustement à leurs justes besoins, alors le processus peut être évalué au niveau 3 (nous suggérons au lecteur de faire très succinctement l'exercice d'évaluation concernant l'intégration des disciplines dans son entreprise).

La plupart des modèles de maturité, dont CMMI, présentent deux approches pour définir les plans de progression :

- ❑ L'approche **modèle à degrés** propose un chemin d'amélioration standard combinant, à chaque étape, l'acquisition de nouvelles pratiques et l'amélioration de pratiques acquises et donne les critères d'évaluation pour se situer sur ce chemin. Il transpose à l'organisme les 5 degrés de l'échelle générique (niveau 1 : l'organisme repose sur les savoir-faire individuels, niveau 2 : les projets de l'organisme sont gérés ; niveau 3 : l'organisme a standardisé ses activités ; niveau 4 : l'organisme est modélisé ; niveau 5 : l'organisme s'optimise). Cette approche correspond bien à l'évaluation par un tiers, et donc au besoin d'assurance qualité dans le métier, ou encore à l'étalonnage concurrentiel (*benchmarking*).

En termes d'auto-évaluation pour recherche d'amélioration, le modèle à degré présente l'avantage de la simplicité, la voie d'amélioration pour atteindre le degré supérieur étant strictement définie.

- ❑ L'approche **modèle continu** est un instrument de mesure qui permet une analyse par processus, en mettant en évidence les points forts et points faibles et donc les priorités d'amélioration, tout en laissant la liberté de choix sur les chemins de progression. Cette approche fournit ainsi un profil de l'organisme, montrant sa position sur l'échelle de maturité par processus ou domaine de processus.

Le modèle continu répond bien au besoin d'auto-évaluation pour l'organisme qui veut choisir le chemin de progrès le plus adapté à sa stratégie.

De plus ce type de modèle continu se décline facilement pour s'adapter à différents métiers puisqu'il distingue clairement les activités à maîtriser pour atteindre le niveau de maturité visé (qui est spécifique à chaque métier) et la méthode d'évaluation de maturité de ces activités commune à tous les processus (qui est ainsi totalement générique par rapport aux métiers).

Qualité, maturité, valeur

La qualité est, de manière très générale, fondée sur la définition et la bonne mise en œuvre des processus (ISO 9000-2000) visant à satisfaire le client et les autres parties prenantes, d'où l'approche d'ingénierie système fondée sur les processus (Process Based Systems Engineering) qui reste à la base de tout déploiement de l'ingénierie système.

Les modèles de maturité apparaissent comme fournissant les moyens d'évaluer le niveau de maîtrise des processus d'un métier donné (ici l'IS), et de définir des plans de progression, en reliant les normes générale de qualité et des normes de processus spécifiques à ce métier. Ils fournissent donc un outil fondamental pour l'aide au déploiement de l'IS dans l'entreprise.

Ces approches ont incontestablement fait leurs preuves en matière de maîtrise du développement des systèmes complexes et la qualité des produits.

Néanmoins, on constate que ces approches

- ❑ peuvent générer, lorsqu'elles sont mal utilisées, de la procédure inutile, des complications et donc induire des coûts injustifiés,
- ❑ sont lourdes à mettre en place, et de ce fait sont souvent rejetées par les entreprises moyennes.

Toute opération de progression doit donc être analysée en termes de valeur ajoutée réelle pour l'entreprise.

La tendance actuelle consiste à compléter les approches de progression en maturité en transposant à l'IS les approches dites « lean » (littéralement « mince »), initialement développées dans le cadre de la production industrielle pour livrer au moindre coût des produits (ou services) de qualité. Le « *lean systems engineering* » consiste, dans une vision tirée par la juste valeur attribuée aux besoins clients, à identifier et analyser les chaînes de création de valeur dans tout le cycle de développement, afin d'en éliminer tout ce qui ne concoure pas à l'augmentation de valeur ou qui n'est pas strictement indispensable. In *fine*, il s'agit d'optimiser en permanence les flux de création de valeur ajoutée pour répondre en juste à temps au stricte besoin du marché.

ANNEXES

1 BIBLIOGRAPHIE

Voici une sélection de documents qui ont été utilisés pour la rédaction de " Découvrir et comprendre l'IS ":

AFIS

Ensemble des fiches techniques et documents créés par les groupes de travail (2000 à 2008)

IEEE 1220

Standard for Application and Management of the Systems Engineering 1994, 1998

IEEE 1471

IEEE Recommended Practice for Architectural Description of Software-Intensive Systems.

EIA/ANSI 632

Processes for Engineering a System, 1994, 1998

ISO/IEC 15288, NF Z 67-288

System engineering – System Life Cycle Processes, 2002, 2008

Ingénierie des systèmes - Processus de cycle de vie des systèmes, Avril 2003

ISO/IEC 12207, AFNOR NF Z 67-150

Software Life Cycle Processes
Processus du cycle de vie des logiciels, 1995

ISO/IEC 42010

Ingénierie des logiciels et des systèmes – Pratique recommandée pour la description architecturale des systèmes exigeant beaucoup de logiciels, 2007

RG. Aéro 00040A

Recommandation générale pour la spécification de management de programme, 1999

– reprise dans **NF EN 9200 _ L 00-101**

Recommandation générale pour la spécification de management de projet, 2005

Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace

RG Aéro 00077

Management de programme - Guide pour le management de l'ingénierie système, 12/2005
Bureau de Normalisation de l'Aéronautique et de l'Espace

CMMI (Capability Maturity Model® Integration)

CMMI® for Development, Version 1.2 - August 2006

Software Engineering Institute

INCOSE SE Handbook

INCOSE System Engineering Handbook,: A Guide For System Life Cycle Processes and Activities V3 (SEHV3.1) June 2007.

PM Bok

PMI Standard Committee, Duncan W., A guide to the Project Management, Body of Knowledge, 1996
Project management Institute

NASA System Engineering Handbook

Shishko, R.,
NASA 1995.

Martin J. N. : System Engineering Handbook

CRC press, 1997.

Meinadier J.P. : Ingénierie et intégration des systèmes

Paris, Hermès, 1998.

Meinadier J.P. : Le métier d'intégration des systèmes

Paris, Hermès/Lavoisier, 2002

Planchette G., Nicolet J.-L., Valancogne J., Si les risques m'étaient comptés !, Octares Edition, 2002

2 INDEX

acteur humain · 31
action de déploiement/progression · 247
action de maîtrise de risque · 198
activité · 51, 61, 140
· 188
agression · 207
ajustement · 142
AMDEC · 210
amélioration de la qualité · 142
analyse de la valeur · 83, 167, 200
analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de
leur criticité · 210
analyse du soutien logistique · 131
analyse dysfonctionnelle · 205, 209, 210
analyse fonctionnelle externe · 79
analyse fonctionnelle interne · 102
analyse système · 167
arborescence · 103
arborescence fonctionnelle · 102
arborescence physique · 103
arbre de décision · 204
arbre de défaillances · 210
arbre produit · 104
architecture · 110,
architecture fonctionnelle · 41, 111
architecture logique · 41, 111
architecture organique · 41
architecture physique · 41, 112
article de configuration · 176
ASIL · 215
ASL · 131
assurance qualité · 142, 223
atelier d'ingénierie système · 173
audit de configuration fonctionnelle · 179
audit de configuration physique · 179
audit du système de gestion de configuration · 179
auto-évaluation · 251

besoin · 73, 82
bloc constitutif · 104
· 188
boîte noire · 28
bonne pratique · 250
boucle d'ingénierie · 158
boucle politico-stratégique · 243
boucle tactico-opérative · 243

BPMI · 142
BPMN · 142

cadrage · 76
cahier des charges fonctionnel · 79, 82, 85, 234
CALS · 132
· 143, 248
capitalisation des risques · 200
cartographie des processus · 144
CdCF · 234
certification · 125
chemin de progression · 251
clôture de projet · 55
CMMI · 143
complexité · 40
comportement · 33
composition · 41
compromis · 114, 167
concept d'opération · 78
concept de maintenance · 130
conception physique · 113
conceptualisation · 80
conduite de projet · 50, 224
configuration applicable · 176
configuration appliquée · 177
configuration approuvée courante · 176
configuration de référence · 176
constituant · 40
constituant logique · 111
contexte redouté · 207
· 132
contrainte · 79, 83
· 111
contrôle qualité · 142, 224
couche défensive · 211
coût de cycle de vie · 202
coût global de possession · 202
critère d'appréciation · 82
criticité · 194, 197
cycle de développement · 55, 57
cycle de développement de lignes de produits · 233
cycle de développement en spirale · 233
cycle de développement évolutif · 233
cycle de développement incrémental · 233
cycle de qualité PDCA · 141
cycle de vie · 32, 63, 229
cycle de vie de projet · 53, 55, 221, 233
cycle en V · 146

DAFC · 236

DAL · 215

· 111

DCP · 234

DD · 115

décomposition · 41, 42, 101, 102

défaillance · 208

définition · 28, 115, 146

démarche ascendante · 42

démarche descendante · 42

déploiement · 127

déploiement de l'IS · 246

déroulement de projet · 55

DI · 116, 236

diagramme d'état · 182

diagramme de bloc · 181

diagramme de flux de commande · 111

diagramme de flux de données · 111, 181

diagramme de flux fonctionnels · 111, 181

diagramme de séquence · 181

disponibilité · 208

disponibilité opérationnelle · 132

DJD · 235

domaine du management de projet · 152

dossier d'approvisionnement, de fabrication et de
contrôle · 236

dossier de conception préliminaire · 234

dossier de définition · 115, 235

dossier de justification de la définition · 235

dossier de spécification du système · 234

dossier industriel · 116, 236

DSS · 234

échelle de maturité · 249

échelon de maintenance · 130

effectivité d'un système · 201

efficacité d'un système · 202

efficacité de processus · 142

efficience d'un système · 202

efficience de processus · 142

EIA/ANSI 632 · 143

élément du soutien logistique · 130

émergence · 40

enregistrement des configurations · 178

environnement · 29, 32, 82

équipe intégrée d'ingénierie · 62, 218

ergonomie · 117

erreur · 208

estimation des risques · 197

estimations de fiabilité prévisionnelle · 210

étalonnage concurrentiel · 251

état · 45

état de fonctionnement · 44, 45

étude amont · 80

étude d'impact · 82

étude de compromis · 168

évaluation des processus · 142

évaluation/comparaison des exigences · 161

évaluation-comparaison des architectures · 163

événement · 43

événement redouté · 207

évolution · 33

exemplaire · 28

exigence · 73, 85

exigence allouée · 90, 104

exigence constituant · 90

exigence dérivée · 90

exigence fonctionnelle · 89, 104

exigence induite · 104

exigence initiale · 73, 87

exigence non fonctionnelle · 89, 104

exigence spécifiée · 73, 105, 115

exigence système · 73, 87

exigence technique système · 87

exigences dérivées · 104

existant · 80

facteur de risque · 195

facteur humain · 117

faisabilité · 80

faute · 209

fiabilité · 132, 207

finalité · 29, 78, 80

finalité de projet · 51

flexibilité · 83

flux · 32, 81

fonction · 79

fonction d'interface · 103

fonction de service · 79, 81

fonction de sûreté de fonctionnement · 103

fonction opérationnelle · 79

fonctionnement · 33, 45

· 111

gestion de configuration · 176

granularité · 43

gravité des conséquences · 194

hirarchisation · 83

homologation · 126

identification des configurations · 177
identification des risques · 196
IEC 61508 · 215
IEEE 1220 · 143
immunité · 208
industrialisation · 236
ingénierie concourante · 218
ingénierie des exigences · 87, 94, 175
ingénierie des processus · 142
ingénierie du soutien · 131
ingénierie parallélisée · 217
ingénierie simultanée · 62, 122, 218
Ingénierie Système · 139
initialisation de projet · 53
innocuité · 208
intégration · 42, 101, 122, 123
intégration dans l'environnement · 127
intégrité · 208
interaction · 30, 40
interface · 30, 41, 106
interface externe · 113
interface interne · 112, 113
interface organisationnelle · 62
interface physique · 107
· 188
invariants (de l'IS) · 139
ISO 15288 · 143, 144
IVV · 122
IVVQ · 122

jalon · 55, 220, 229, 231
justification de la définition · 235

lancement d'un projet · 53
· 251
lignes de produits · 48
lot de travaux · 221

maintenabilité · 132, 208
maintenance · 129
maintenance corrective · 130
maintenance curative · 129
maintenance évolutive · 130

maintenance perfective · 130
maintenance préventive · 129
maintien en condition opérationnelle · 127, 128
maîtrise des évolutions · 178
management de l'IS · 50, 67
management de l'IS dans l'entreprise · 243
management de processus · 141
management de programme · 239
management de projet · 50, 67
management des opportunités · 193
management des risques · 192
management opératoire · 221
management stratégique · 220, 229
marge · 88
matrice de couplage · 107, 123
matrice de dépendances · 107
matrice de traçabilité · 105, 123
matrice de vérification · 123
matrice N² · 107
maturité · 142, 249
maturité des exigences · 94
MCO · 128
menace · 193, 207
ment redouté · 193
mérites d'un système · 201
méthode · 169
mission · 34, 78
mode de défaillance · 209
mode de fonctionnement · 34, 45
mode dégradé · 211
modèle · 28
modèle comportemental · 181
modèle d'évaluation d'efficacité · 203
modèle d'évolution de maturité des logiciels · 210
modèle de coût · 202
modèle de données · 181
modèle de données d'IS · 173
modèle de maturité · 143, 248
modèle de maturité à degrés · 251
modèle de maturité continu · 251
modèle économique · 203
modèle entité-relation · 180
modèle sémantique · 180
modèle structurel · 181
modélisation · 171
modélisation des processus · 142
module fonctionnel · 111

niveau action · 241
niveau d'invariance temporelle · 43
niveau d'exigences · 83
niveau opératif · 241
niveau politique · 240
niveau stratégique · 240

niveau tactique · 241
niveaux de maîtrise de programme · 239
niveaux techniques d'intervention · 130
non sommativité · 40

opérateur · 128
opportunité · 80
optimisation · 47, 167
· 223
organisation de projet · 62
organisation matricielle · 62
outil · 169
outil méthodologique de l'IS · 174

· 188
panne · 209
· 188
partie prenante · 74
partie prenante impliquée · 74
partie prenante intéressée · 74
PDCA · 141
personnalisation · 127
pertinence d'un système · 202
phase · 32, 55
phase d'intégration et qualification de la définition · 235
phase de conception préliminaire · 234
phase de développement · 235
phase de spécification système · 234
phase de transfert vers l'utilisation et qualification
opérationnelle · 237
phase d'industrialisation et qualification industrielle · 236
pilotage · 43
pilotage coopératif · 45
pilotage de projet · 65
pilotage des systèmes · 38, 45
pilotage hiérarchisé · 45
pilotage opératoire de projet · 65
pilotage stratégique de projet · 65, 228
PJD · 123
plan justificatif de la définition · 123
planification de la configuration · 177
planification de projet · 50, 54, 223
planning de projet · 64
planning des tâches · 221
planning directeur · 221
politique de maintenance · 130
principe de prévention · 194, 207
principe de protection · 194, 207
principe de sauvegarde · 194, 207
probabilité d'occurrence · 194
problème · 73

processus · 51, 61, 63, 140, 169
processus ajusté · 142
processus contractuel · 135, 144, 155
processus contractuel d'acquisition · 155
processus contractuel de fourniture · 155
processus d'acquisition · 238
processus d'analyse des exigences · 159
processus d'analyse des exigences des parties prenantes ·
148
processus d'analyse fonctionnelle et allocation · 159
processus d'analyse système · 159, 166
processus d'entreprise · 156, 244
processus d'évaluation et de justification · 163
processus d'évaluation-comparaison · 151, 166
processus d'exploitation · 151
processus d'intégration · 150
processus d'IVV · 150
processus d'analyse des exigences des parties prenantes ·
160
processus de conception · 149, 161
processus de conception logique · 149
Processus de conception logique · 162
processus de conception physique · 149, 163
processus de décision · 153
processus de définition des exigences · 148
processus de gestion de la configuration · 154
processus de maintien en condition opérationnelle · 151
processus de maîtrise d'un projet · 152
processus de maîtrise des risques · 194
processus de management · 135, 144
processus de management de l'information · 154
processus de management de l'innovation · 157
processus de Management de la Qualité · 157
processus de management de l'environnement de
l'entreprise · 157
processus de management de l'investissement dans les
projets · 157
processus de management de projet · 152
processus de management des infrastructures · 157
processus de management des processus · 157, 245
processus de management des ressources humaines · 157
processus de management des risques · 153
processus de planification d'un projet · 152
processus de planification de projet · 225
processus de retrait de service · 151
processus de spécification des exigences · 160
processus de spécification des exigences techniques · 148
processus de suivi d'un projet · 152
processus de suivi et de maîtrise de projet · 227
processus de transition vers l'utilisation · 151
processus de V & V · 165
processus de validation · 150
processus de vérification · 150
processus défini · 141
processus d'entreprise · 135, 144
processus institutionnalisé · 141

processus normalisé · 141
processus technique · 144, 146
· 223
produit contributeur · 36
profil de mission · 34
profil de vie · 34
programme · 24, 48, 238
projet · 24, 48
projet de développement · 24
propriété émergente · 40

qualification · 125
qualification de la définition · 125, 236
qualification industrielle · 125, 237
qualification opérationnelle · 125, 237
qualité · 142, 248
qualité de service · 82

rapport efficacité sur coût · 167
rapport utilité sur coût · 167
RCD · 235
RCP · 234
recueil des besoins · 81
référentiel d'exigences · 90
régulation · 43
· 188

résilience · 205
résilience des systèmes · 205
responsabilité · 60
ressource · 51, 221
retrait de service · 132
revue critique de définition · 235
revue de définition préliminaire · 234
revue de projet · 220, 229
risque · 167, 205
risque programmatique · 196
risque projet · 192, 205
risque système · 192, 205, 213

SADT · 183, 187
Sagace · 189
SART · 187
SA-SD · 187
scénario d'enchaînement · 45
scénario de comportement externe · 79
scénario opérationnel · 78, 81
scénarios d'échanges · 79
· 188

SIL · 215
simulation · 171
SLI · 131
solution · 73
sous-projet · 49, 61
soutien logistique intégré · 129, 131
spécification · 85
spécification formelle · 211
stade · 32, 55
· 188
statechart de Harel · 182
Statemate · 187
· 223
stratégie de déploiement · 247
structure matricielle · 245
suivi des risques · 199
sûreté de fonctionnement · 205
SysML · 180
système · 24
système à logiciel prépondérant · 119
système contributeur · 35, 127
système contributeur au projet · 57
système contributeur non opérationnel · 36
système contributeur opérationnel · 36
système de soutien · 25, 127, 129
système de soutien logistique · 36, 129
système de soutien opérationnel · 127
système englobant · 30
système étudié · 25
système principal · 25, 35
système socio-technique · 31, 117, 118

tâche · 61
tolérance aux pannes · 211
traçabilité · 105, 175
traçabilité des exigences · 46, 92
transition · 45
transition vers l'exploitation · 127
typologie des exigences · 89

UML · 180, 187
· 188

V et V · 93
validation · 164
validation des architectures · 163
validation des exigences · 93, 161
validation externe · 93

variante · 28
vérification · 164
vérification des architectures · 163
vérification des exigences · 93, 161
vie opérationnelle d'un système · 127
vision boîte blanche · 27
vision boîte noire · 27
vulnérabilité · 193, 207

· 223

Zachman · 191