



HAL
open science

Proposals for the definition and the implementation of systems engineering processes : application int the case of the concurrent desing in the area of car industry

Patrice Micouin

► To cite this version:

Patrice Micouin. Proposals for the definition and the implementation of systems engineering processes : application int the case of the concurrent desing in the area of car industry. Humanities and Social Sciences. Arts et Métiers ParisTech, 2006. English. NNT : 2006ENAM0028 . pastel-00002518

HAL Id: pastel-00002518

<https://pastel.hal.science/pastel-00002518>

Submitted on 12 Jun 2007

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

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



Ecole doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

THÈSE

pour obtenir le grade de

Docteur

de

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité "Génie Industriel"

*présentée et soutenue publiquement
par*

Patrice MICOUIN

le 15 septembre 2006

**PROPOSITIONS POUR LA DEFINITION ET LA MISE EN PLACE
DE PROCESSUS D'INGENIERIE DE SYSTEMES :**

**APPLICATION AU CAS DE LA CONCEPTION CONCURRENT
DANS LE SECTEUR DE L'AUTOMOBILE.**

Directeur de thèse : Jean Paul KIEFFER

Jury :

M. Ameziane AOUSSAT, Professeur, LCPI, ENSAM, Paris Président
M. Jean-Claude BOCQUET, Professeur, LGI, Ecole Centrale de Paris Rapporteur
M. Emmanuel CAILLAUD, Professeur, LGECO, INSA de Strasbourg Rapporteur
M. Jean Bernard CAVAILLE, Professeur, Sup' Aéro, Toulouse Examineur
M. Emmanuel COMBES, Directeur de Projet VHP, PSA Peugeot Citroën Examineur

Laboratoire de s Sciences de l'Information et des Systèmes UMR CNRS 6168
ENSAM, CER d' Aix-en-Provence

Propositions pour la définition et la mise en place de processus d'ingénierie de systèmes :
Application au cas de la conception concurrente dans le secteur de l'automobile.

RESUME :

La rationalisation des processus de développement de systèmes (tels qu'aéronefs, systèmes satellitaires, navires, véhicules automobiles, etc.) ne date pas d'aujourd'hui. Elle a cependant pris un cours nouveau avec la diffusion au début des années quatre vingt-dix d'un corps de connaissances appelé ingénierie des systèmes (systems engineering). Nombre d'entreprises concevant et réalisant des systèmes adoptent des processus d'ingénierie système (systems engineering processes) s'appuyant sur ce corpus de connaissances (SEBOK, systems engineering body of knowledge). Dans ce contexte, notre travail a consisté à :

(A) mettre en évidence que la logique dominante de ce corpus est une logique instrumentale de mise en concordance de moyens par rapport à des fins, laquelle assure jusqu'à un certain point la répétabilité des résultats recherchés ;

(B) montrer que le SEBOK présente deux lacunes qui sont causes d'incompréhensions entre parties prenantes :

(1) il n'offre pas de théorie des systèmes techniques cohérente basée sur des concepts robustes mais agrège trop souvent des notions pas ou mal définies (comme celle d'exigence) et des propositions méthodologiques discutables (par exemple, celle selon laquelle l'analyse fonctionnelle constitue un des outils principaux pour la conception innovante de systèmes),

(2) il ne propose pas non plus de dispositifs permettant d'assurer des processus d'entente entre parties prenantes, et de faire collectivement des choix de conception justifiés ;

(C) proposer des éléments cohérents d'une théorie des systèmes techniques et de leur développement

(D) proposer un dispositif collectif de conception et de justification des choix de conception fondé sur les possibilités de l'argumentation ;

(E) illustrer l'application d'une partie de nos propositions au cas de la conception innovante d'une chaîne de traction hybride pour véhicules particuliers.

théorie des systèmes techniques, ingénierie système, effets recherchés (fonctions) et effets concomitants, exigences, conception logique, conception physique, synthèse, décision, argumentation et justification, groupe moto propulseurs

Mots-clés : hybride électrique et véhicule hybride électrique

Proposals for the definition and the implementation of systems engineering processes :
Application in the case of the concurrent design in the area of car industry

ABSTRACT

The rationalization of systems (such as aircrafts, space systems, ships and warships, ground vehicles, etc.) design and redesign processes is not a new phenomenon. Nevertheless, it has taken a new course when, at the beginning of ninetieth , a body of knowledge and tenet named systems engineering spread among systems makers. A lot of companies designing and manufacturing systems adopt and implement systems engineering processes based on this body of knowledge (SEBOK, systems engineering body of knowledge).

Within this context, my research consisted in:

(A) showing that the main logic of this body of knowledge is an instrumental logic binding means to ends, which ensures up to some point the repeatability of the required results (in spite of mitigated successes and failures) ;

(B) showing that the SEBOK presents two gaps which are the causes of incomprehension between stakeholders :

(1) it does not offer a consistent technical systems theory based on robust concepts but merge too often not or badly definite concepts (for instance, that of requirement) and challengeable methodological proposals (for instance, that according to which the functional analysis constitutes one of the main tools for the innovative systems design),

(2) it does not propose either devices making it possible on the one hand to ensure of the processes of agreement among stakeholders, in addition to make collectively justified choices of design ;

(C) providing consistent elements of technical systems theory and their development

(D) to propose a collective device of design and design rationale based on possibilities of the argumentation ;

(E) illustrating the application of part of our proposals to the case of the innovating design of a electric hybrid powertrain for private citizen vehicles.

Keywords: Technical systems theory, systems engineering, intended (functions) and concomitant effects, requirements, logical and physical design, synthesis, decision, argumentation and rationale, Hybrid Electric Powertrain and Hybrid Electric Vehicle



Remerciements

Ce travail de recherche trouve son origine lointaine dans un ensemble de missions que j'ai eu la chance de réaliser dans des contextes aussi variés que ceux de la conception de systèmes de contrôle commande de circulations ferroviaires à la Direction de la Recherche de la SNCF sous la direction de Patrice Bernard, de l'ingénierie du parc nucléaire en exploitation au CIPN d'EDF sous la direction de messieurs Cabannes et Collon, de la modélisation de plateforme de micro satellites au CNES avec André Laurens. J'adresse mes sincères remerciements à toutes ces personnes et bien d'autres encore qui ont contribué, le plus souvent sans le savoir, à ma formation en ingénierie des systèmes techniques.

Ce travail de recherche a ensuite une origine plus immédiate dans une mission réalisée pour PSA Peugeot Citroën dans le cadre d'un projet d'innovation relatif à la conception de chaînes de traction hybrides parallèles sous la responsabilité d'Emmanuel Combes et en coopération avec Jean Malvache, Jean Personnaz et Arnaud Satre, de PSA Peugeot Citroën. Je leur adresse à tous mes plus vifs remerciements pour une des périodes des plus stimulantes de mon parcours professionnel.

Ce travail de recherche a été possible grâce à l'accueil que m'a fait et au soutien que m'a apporté mon directeur de thèse, Jean Paul Kieffer, Directeur du CER d'Aix-en-Provence de l'ENSAM. Je le remercie ici de son écoute attentive et bienveillante, de la pertinence de ses remarques, objections et propositions dans la direction de mon travail.

Je remercie également tous les membres de l'équipe de recherche IMS du LSIS qui ont bien voulu me faire une place parmi eux et en particulier, Daniel Brun-Picard, Philippe Veron et François Malburet. Je remercie tout particulièrement Philippe Veron et Aline Cauvin, pour le rôle de « sparing partners » qu'ils ont bien voulu jouer dans la préparation de ma soutenance et pour les remarques judicieuses qu'ils m'ont faites à cette occasion.

Je remercie les membres du Jury, messieurs Aoussat, Bocquet, Caillaud, Cavaillé et Combes pour le soin avec lequel ils ont analysé mon manuscrit, la pertinence des remarques qu'ils m'ont faites et l'intérêt qu'ils ont porté à ma soutenance.

Mes remerciements vont aussi aux participants du séminaire Systems Engineering que j'ai organisé avec Jean Paul Kieffer de 2002 à 2005. Je tiens en particulier à remercier messieurs Miginiac et Witte de Dassault Aviation, messieurs Achache, Chiavassa, Demeriliac, Hibos et Godard d'Eurocopter, madame Maïs et messieurs Logier, Hasse, Py, de Lassus et Mervin de DCN, madame Droulers et monsieur Romain de STMicroelectronics, messieurs Lalumia et Guillermain de Technicatome, messieurs Luzeaux, Ruault, Narçon, Pradeilles et Marchal de la DGA, messieurs Lardeur, Vassal et Emelina de PSA Peugeot Citroën, le capitaine de corvette Lafont et madame Segalen du Service du Soutien de la Flotte (Marine Nationale) et tous ceux qui ont apporté leur concours à la réussite de ce séminaire. Ils m'ont fourni l'occasion de exposer la plupart de mes propositions, d'en évaluer la pertinence et de faire face à leurs objections.

Mes remerciements vont enfin à ma compagne Monique, ma première lectrice, dont la critique sans concession n'aura eu d'égal que les encouragements, le soutien moral et l'amour.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciements | 3 |
| Table des matières | 4 |
| Introduction générale..... | 7 |
| Contexte du travail | 8 |
| Présentation du mémoire | 9 |
| Première Partie : Une taylorisation de l'ingénierie? | 11 |
| Chapitre 1 | 12 |
| Les ingénieurs système..... | 12 |
| 1.1. Une communauté professionnelle | 12 |
| 1.2. L'INCOSE et l'AFIS..... | 12 |
| 1.3. Standards et corpus de connaissances | 13 |
| Chapitre 2 | 15 |
| Ontologie des systèmes techniques, les systèmes selon les standards et l'INCOSE | 15 |
| 2.1. L'IEEE 1220 Standard for the Systems Engineering Process..... | 15 |
| 2.2. EIA-632 Processes for Engineering a System..... | 16 |
| 2.2.1. Produits finals et produits supports | 16 |
| 2.2.2. Building blocks | 16 |
| 2.3. ISO 15288 System Life Cycle Processes | 17 |
| 2.4. Les systèmes selon l'INCOSE..... | 17 |
| Chapitre 3 | 19 |
| L'ingénierie des systèmes selon trois standards différents..... | 19 |
| 3.1. Les processus d'ingénierie selon IEEE 1220 | 19 |
| 3.1.1. Les objectifs de IEEE 1220..... | 19 |
| 3.1.2. Les processus d'ingénierie selon IEEE-1220 | 19 |
| 3.2. Les processus d'ingénierie selon EIA 632 | 23 |
| 3.2.1. Les objectifs de l'EIA-632 | 24 |
| 3.2.2. Les processus d'ingénierie selon EIA-632 | 24 |
| 3.2.3. Processus d'ingénierie et building blocks | 27 |
| 3.3. L'ISO 15288 « Systems Engineering - System Life Cycle Processes »..... | 28 |
| 3.3.1. Les processus du cycle de vie système selon l'ISO 15288..... | 28 |
| 3.4. Comparaison des trois standards ISO 15288 – EIA 632 – IEEE 1220. | 30 |

| | |
|--|-----|
| Chapitre 4 | 33 |
| Analyse critique des conceptions les plus courantes et interprétations | 33 |
| 4.1. Un concept commun, le concept de fonction | 33 |
| 4.1.1. Effets recherchés et transformations | 33 |
| 4.1.2. Principe de décomposition : arborescences fonctionnelles | 36 |
| 4.1.3. Effets recherchés et effets concomitants | 39 |
| 4.2. Les infortunes de l'ingénierie de systèmes..... | 41 |
| 4.2.1. Un exemple, le désastre de la constellation Iridium | 41 |
| 4.2.2. Pourquoi les projets d'ingénierie échouent-ils si souvent ? | 42 |
| Conclusion de la première partie : la taylorisation des activités de conception ? | 45 |
| Deuxième Partie : Théorie des systèmes techniques et Processus d'entente | 47 |
| Introduction : ingénierie et formes de la rationalité | 48 |
| Les différentes formes de la rationalité | 48 |
| L'articulation nécessaire des trois formes de la rationalité | 50 |
| Chapitre 5 | 51 |
| Propositions pour une ontologie des systèmes techniques | 51 |
| 5.1. Ontologie des systèmes | 51 |
| 5.1.1. Systèmes | 51 |
| 5.1.2. Systèmes concrets..... | 53 |
| 5.1.3. Systèmes conceptuels | 59 |
| 5.2. Les hiérarchies de systèmes concrets | 66 |
| 5.2.1. Systèmes, sous-systèmes et sur-systèmes..... | 66 |
| 5.2.2. Structure de décomposition d'un système. | 66 |
| 5.2.3. Propriétés résultantes et émergentes..... | 67 |
| 5.3. Les systèmes techniques..... | 68 |
| 5.3.1. « Le facteur humain »..... | 68 |
| 5.3.2. Les artefacts..... | 69 |
| 5.3.3. Les systèmes techniques..... | 69 |
| 5.3.4. Effets recherchés et concomitants. | 70 |
| 5.3.5 Fonctions et transformations. | 71 |
| 5.3.6 Modes et états de fonctionnement. | 72 |
| 5.3.7 Phylogénèse et ontogénèse des systèmes techniques | 73 |
| 5.4. Conclusion sur l'ontologie des systèmes techniques..... | 74 |
| Chapitre 6 | 76 |
| Propositions pour l'Ingénierie des Systèmes Techniques | 76 |
| 6.1. Propositions pour la conception des systèmes..... | 76 |
| 6.1.1. Le noyau décisionnel du processus de conception | 77 |
| 6.1.2. La synthèse des exigences | 78 |
| 6.1.3. Les synthèses fonctionnelle et physique..... | 88 |
| 6.2. La prudence en ingénierie | 97 |
| 6.2.1. L'action technique et la contingence..... | 99 |
| 6.2.2. L'ingénierie comme processus de concrétisation des systèmes | 99 |
| 6.2.3. L'ingénierie comme processus de synthèse des systèmes techniques | 102 |
| 6.2.4. L'ingénierie comme processus d'entente entre des parties prenantes à propos du système... 103 | |
| 6.2.5. L'ingénierie comme processus collectif de décisions justifiées | 104 |

| | |
|---|-----|
| Chapitre 7 | 114 |
| Véhicules Hybrides Electriques | 114 |
| 7.1. Le principe de véhicule hybride | 114 |
| 7.2. Ingénierie des Exigences appliquées à un véhicule hybride..... | 118 |
| 7.2.1. Modèles d'usage..... | 118 |
| 7.2.2. Exigences opérationnelles pour un véhicule hybride | 119 |
| 7.3. Conception de systèmes de chaînes de traction hybrides | 122 |
| 7.3.1. Chaînes « fonctionnelles » et Modes..... | 122 |
| 7.3.2. Architectures série et parallèle | 125 |
| 7.3.3. Architectures parallèle simple et double arbres..... | 127 |
| 7.3.4. Commutation des modes | 128 |
| 7.3.5. Dimensionnement fonctionnel..... | 128 |
| 7.3.6. Système de pilotage ou contrôle-commande | 135 |
| 7.3.7. Conception physique | 137 |
| 7.3.8. Systèmes auxiliaires et ancillaires | 139 |
| 7.3.9. Ingénierie de la décision..... | 140 |
| Conclusion de la seconde partie | 142 |
| Conclusions et perspectives..... | 143 |
| Bibliographie..... | 145 |
| Annexes | 148 |
| Annexe 1 : Ontologie des systèmes technologiques..... | 149 |
| Annexe 1.1 Les systèmes selon B. Blanchard et W.Fabrycky | 149 |
| Annexe 1.2 Les systèmes selon J.P. Meinadier..... | 151 |
| Annexe 1.3 Les systèmes et les modèles de B. Walliser | 152 |
| Annexe 1.4 Le constructivisme de J-L Le Moigne | 153 |
| Annexe 2 : Méthodes de conception des systèmes..... | 157 |
| Annexe 2.1 PSARE..... | 157 |
| Annexe 2.2 Sagace | 166 |
| Annexe 2.3 Le langage de modélisation des systèmes – SysML | 170 |
| Annexe 2.3.1. UML, l'OMG , L'INCOSE et l'Ingénierie des Systèmes | 170 |
| Annexe 2.3.2. Le RFP UML for SE de l'OMG..... | 171 |
| Annexe 2.3.3. Le langage de modélisation SysML..... | 172 |
| Annexe 3 : Les cinq genres de systèmes concrets selon Mario Bunge | 175 |
| Annexe 3.1 Les systèmes physiques | 176 |
| Annexe 3.2 Les systèmes chimiques | 176 |
| Annexe 3.3 Les systèmes biologiques..... | 176 |
| Annexe 3.4 Les systèmes sociaux | 177 |

Introduction générale

*“The systemist expert is a jack of all trades .
– a quasi-philosopher if not a full blown one”*

Mario Augusto Bunge
Treatise on Basic Philosophy,
Ontology II: A world of systems, 1979.

Contexte du travail

Le développement de systèmes techniques innovants, notamment dans le secteur de l'automobile mobilise de nombreux spécialistes (mécaniciens, thermiciens, électriciens et électroniciens, automaticiens, informaticiens, ingénieur produit, ingénieur des coûts, etc.) mettant en œuvre les méthodes, des modèles de représentation et des techniques des génies qui leurs sont propres.

Une simple juxtaposition de ces compétences dans le cadre d'un projet de développement d'un système peut aboutir à des visions morcelées, voir conflictuelles du système à développer, potentiellement difficiles à intégrer.

L'ingénierie de systèmes intervient alors comme une activité fédératrice visant à structurer et intégrer les efforts des différentes disciplines spécialisées, à identifier les conflits, réaliser les compromis acceptables et explorer des alternatives dans le cadre d'un processus appelé processus d'ingénierie de systèmes.

Le (ou les) processus d'ingénierie de systèmes (SEP¹) a (ont) fait l'objet de plusieurs standardisations concurrentes, dont le standard le [MIL-STD-499B 95] (jamais publié) a constitué le socle commun. Pour celui-ci, le processus d'ingénierie de systèmes est constitué de trois processus majeurs :

- « Requirements Analysis » ou analyse des exigences,
- « Functional Analysis/Allocation » ou analyse fonctionnelle et allocation,
- « Synthesis » ou synthèse.

qui sont complétés par un processus nommé « System Analysis & Control ».

Les deux descendants immédiats de ce standard sont l'IEEE 1220-1998 [IEEE 1220 – 05] très récemment révisé², et l'EIA-632-1998 [EIA 632 03] confirmé en 2003. Plus lointain héritier, l'ISO 15288-2002 [ISO 15288 – 02] constitue la référence obligée, compte tenu de l'importance de l'ISO.

A coté et/ou en cohérence avec ces trois références majeures, des démarches analogues ont été développées :

- soit qu'elles concernaient des domaines spécifiques comme [ECSS-E-10-A 96] qui concerne l'ingénierie du domaine spatial (initiative de l'industrie spatiale européenne),
- soit encore qu'elles s'intégraient dans une autre dynamique comme celle des modèles de maturité représentés notamment par le CMMI [CMMI 02]
- soit enfin qu'elles procédaient des démarches plus nationales comme la [RG Aéro 00040A – 99] et ses documents dérivés ou encore [NF X50-127-02].

On a pu comparer cette profusion de standards qui encadrent le domaine à un marécage duquel il serait difficile de s'extirper. Dans la première partie de notre travail, nous nous concentrerons donc sur la présentation des trois standards majeurs bien qu'il faille reconnaître aux seconds, ça et là, des mérites qu'une lutte, parfois inégale, ne retiendra probablement pas.

Un processus d'ingénierie des systèmes automobiles est en cours d'élaboration chez les constructeurs. Nous avons participé à une telle élaboration de 1999 à 2001 chez un constructeur et ce travail de thèse en est un prolongement. Cette participation s'est effectuée, sur le terrain, sur un projet de conception d'une chaîne de traction hybride parallèle.

¹ SEP : System Engineering Process

² Publication 4^{ième} trimestre 2005

Cette confrontation de la pratique à l'état de l'art des méthodes d'analyse des exigences (analyse fonctionnelle externe) d'analyse fonctionnelle (interne), de synthèse et d'analyse système telles qu'elles sont décrites dans les normes, standards et ouvrages méthodologiques montre entre autres choses:

- d'une part, la pertinence de la démarche permettant une structuration et une intégration des activités de conception,
- d'autre part, des limites au sein des méthodes ayant cours que nous avons tenté de pallier dans l'action, puis de corriger en élaborant des apports méthodologiques.

Et ce sont ces deux aspects sur lesquels nous focalisons le développement de cette thèse.

Présentation du mémoire

Nous avons structuré notre travail en deux parties :

- Dans une première partie, nous procédons à un état de l'art, c'est-à-dire à une présentation
 - d'une communauté professionnelle, celle des ingénieurs système, de ses associations, de ses standards et de son corpus de connaissances,
 - des différentes conceptions de ce qu'est un système technique au sein de cette communauté, ceci en nous appuyant sur les standards,
 - des différentes conceptions de la façon dont cette communauté appréhende la manière selon laquelle le processus d'ingénierie des systèmes doit être conduit.

Puis, nous procédons à une critique de l'état de l'art, c'est-à-dire que nous nous sommes efforcé d'en pointer ce qui nous apparaît comme des insuffisances, des limitations ou des fausses pistes.

Selon nous, les visions proposées par les standards et le corpus de connaissances de l'ingénierie ont incontestablement permis de rationaliser les démarches d'ingénierie de systèmes et donc améliorer la maîtrise des processus de développement.

Cependant cette rationalisation des démarches d'ingénierie ne sollicite qu'un des ressorts de la rationalité, instrumental et ne laisse que peu de place aux autres ressorts de la rationalité: le ressort cognitif et le ressort de l'entente. Aussi, l'édifice formé, s'il est fortement structuré dans sa dimension processus (présenté comme une succession détaillée de buts et de moyens) présente des insuffisances réelles tant sur le plan de ses fondations théoriques (qui relèvent de la rationalité cognitive) que sur le plan de sa dimension humaine collective (qui relève de la rationalité de l'entente).

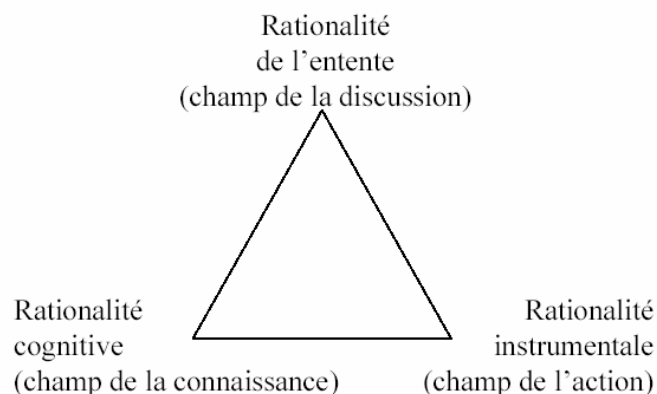


Figure 0.1. *Les trois racines de la rationalité.*

- C'est pour cela que, dans une deuxième partie, nous nous proposons de contribuer à un rééquilibrage des points de vue (instrumental, cognitif, entente) qui prévalent en ingénierie des systèmes:

10 Propositions pour la définition et la mise en place de processus d'ingénierie de systèmes

- en proposant une définition des systèmes et en particulier des systèmes techniques très largement marqués par le réalisme scientifique de l'épistémologue **Mario Bunge**, et en proposant un ensemble de clarifications conceptuelles qui devrait permettre de combler une partie du déficit théorique du corpus,
- en proposant une vision du processus d'ingénierie centré sur la synthèse autour d'un noyau décisionnel. Nous terminerons nos propositions en développant notre concept de **prudence** en ingénierie qui fait du processus d'ingénierie un processus d'entente de parties prenantes et de décisions justifiées. Ces propositions devraient permettre de combler une partie du déficit du corpus relativement à l'entente et l'accord entre parties prenante,
- nous illustrons une part de nos propositions à partir d'une présentation d'un cas concret, celui de la conception d'une chaîne de traction hybride.

Au terme de ce travail, nous pourrions proposer :

- d'une part, une conception des systèmes techniques adossée à une théorie générale des systèmes, consistante et globale,
- et d'autre part, une architecture des processus d'ingénierie organisée autour d'un processus pragmatique de décision et d'argumentation.

qui s'enracinent dans une vision moins « unidimensionnelle » et instrumentale de la rationalité mais qui, au contraire, s'appuient sur ce que J. Habermas considère former les trois fondements de la rationalité, les « racines » cognitive, instrumentale et sociale de l'entente.

Première Partie : Une taylorisation de l'ingénierie?

« La rationalité formelle est au fondement de la culture industrielle contemporaine ».

*« La raison réside dans la capacité de calculer des probabilités et
d'ordonner ainsi les moyens corrects à une fin donnée »*

Max Horkheimer

Critique de la rationalité instrumentale.

Chapitre 1

Les ingénieurs système

1.1. Une communauté professionnelle

La communauté professionnelle des ingénieurs systèmes s'est constituée bien avant qu'elle ne s'autoproclame en tant que telle. Nous pourrions en rechercher déjà des formes embryonnaires au sein de la séculaire ASME (American Society of Mechanical Engineers). En revanche, elle ne semble prendre conscience d'elle-même, se nommer et s'institutionnaliser qu'assez tardivement qu'au travers de l'INCOSE notamment au cours des années 90 puis de l'AFIS en 1999.

1.2. L'INCOSE et l'AFIS



L'INCOSE ou International Council On Systems Engineering est une organisation internationale constituée en 1995³ pour promouvoir l'approche ingénierie de système dans le cadre du développement de produits de systèmes multi disciplinaires. La mission qu'elle s'assigne est de stimuler, populariser et encourager, au niveau international, la définition, la compréhension et la pratique de l'ingénierie des systèmes dans l'industrie, l'éducation et au niveau des gouvernements.



Constituée à l'origine par un groupe d'entreprises (les fondateurs), l'AFIS ou Association Française en Ingénierie Système a été créée en 1999 par des grandes entreprises et est composée de deux catégories d'affiliés :

³ Internationalisation de la NCOSE des USA, elle-même constituée en 1990.

- Les membres personnes morales : entreprises et/ou organismes publics fondateurs et les entreprise et/ou organismes publics agréés par le Conseil d'Administration.
- Les adhérents (personnes physiques) : Adhérents individuels pouvant participer aux Groupes de Travail et à la Conférences Annuelle d'Ingénierie Système organisée par l'AFIS.

L'AFIS est membre affilié de l'International Council on Systems Engineering et son représentant en France.

1.3. Standards et corpus de connaissances

Le processus de rationalisation des pratiques de développement des systèmes techniques ne date pas d'aujourd'hui. L'INCOSE a pu présenter ainsi une généalogie des standards sous le schéma présenté ci-dessous.

Cette généalogie fait apparaître un ancêtre commun, le standard militaire MIL-STD-499, conçu à l'origine par l'US Air Force en 1969 et qui a connu ensuite deux révisions (A en 1974, et B en 1994⁴). Il donne ensuite naissance à deux standards civils : IEEE 1220 et l'EIA 632. Dans cette généalogie, l'ISO 15288 apparaît comme une héritière de l'EIA 632. Dans son contenu, elle porte, de façon manifeste, la marque de l'IEEE 1220.

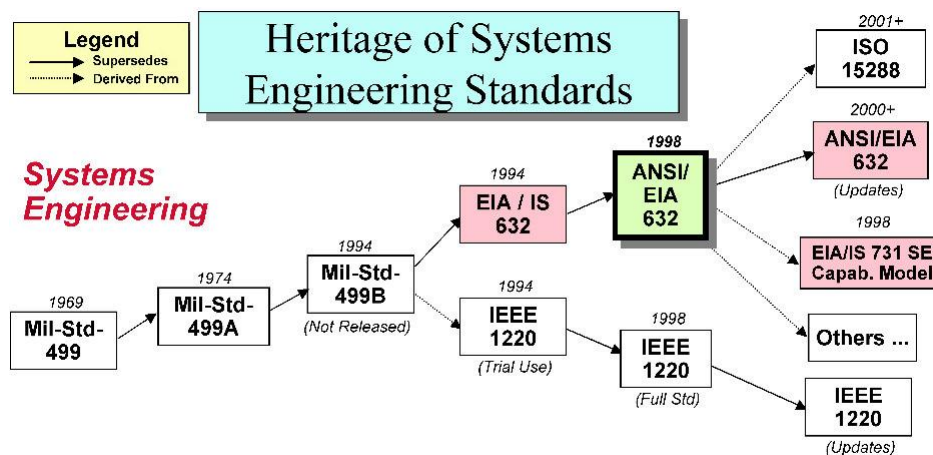


Figure 1.1. Généalogie des standards selon l'INCOSE.

Il existe de nombreux autres standards traitant de l'ingénierie des systèmes. Un recensement exhaustif tournerait rapidement au cauchemar. Pour mémoire, il importe néanmoins de citer :

- dans le domaine des modèles de maturité l'EIA 731 et le CMMI (Capability Maturity Model Integration) dans sa composante SE (Systems Engineering),
- dans le domaine spatial, les standards ECSS-E-10, initiative de l'industrie spatiale européenne,
- les recommandations RG Aéro 000 40 et annexes du BNAE ainsi que les normes NF X50-127 et NF X50-179.

Il ne serait pas matériellement possible de vouloir présenter de façon substantielle l'ensemble des standards et des normes qui traitent d'un ou de plusieurs aspects de l'ingénierie des systèmes. Chacun d'eux présente un intérêt et aucun d'entre eux ne mérite d'être dédaigné.

⁴ Plus, une étonnante version C en 2005, alors que la version B n'a jamais été officialisée !

14 Propositions pour la définition et la mise en place de processus d'ingénierie de systèmes

Nous avons fait le choix de nous conformer d'emblée aux normes et standards⁵ dominants à savoir :

- Les standards ayant cours : l'IEEE 1220 (1998 et 2005) et l'ANSI/EIA 632 (1999 et 2003),
- La norme: l'ISO 15288 -2002.

Pour compléter ce panorama des standards et du corpus de connaissances partagé par la communauté de pairs des ingénieurs système nous avons présenté en annexe :

- Annexe 1 : Une présentation des systèmes par différents auteurs représentatifs dont Blanchard et Fabrycky, Jean Pierre Meinadier, Bernard Walliser et Jean Louis Le Moigne,
- Annexe 2 : Une présentation de deux méthodes de conception de systèmes, PSARE de Hatley Pirbhai et Hruschka et SAGACE de Jean Marie Penalva ainsi qu'un aperçu concernant SySML (Langage de Modélisation des Systèmes développé à l'initiative de l'OMG).

⁵ La distinction entre normes et standards est assez tenue. Le monde anglo-saxon utilise semble-t-il exclusivement le terme de « standard » tandis le terme « norme » prévaut en France

Chapitre 2

Ontologie des systèmes techniques, les systèmes selon les standards et l'INCOSE

Dans ce chapitre nous nous proposons de faire une revue des différentes définitions du terme 'système' que l'on trouve dans la littérature de la communauté professionnelle à laquelle nous nous intéressons, celle des « systems engineers » ou ingénieurs système. Pour cette revue, nous nous proposons d'observer les trois standards majeurs, IEEE 1220, EIA 632 et ISO 15288 ainsi qu'un consensus publié par l'INCOSE. On pourra également se reporter en annexe pour obtenir des vues complémentaires fournies par quelques auteurs majeurs. Pas plus que son successeur immédiat, le MIL-STD-499A rendu public en 1974, le MIL-STD-499-1969 n'éprouve le besoin de proposer une définition de ce qu'est un système. Ainsi l'ensemble des processus décrits par ce standard repose entièrement sur une définition implicite de systèmes. Le même phénomène semble avoir guetté l'ISO 15288 en 2002. Il faut attendre la dernière révision jamais officialisée du standard le MIL-STD-499B en 1995 pour trouver une définition de ce que l'on nomme un système, c'est donc « *un composite intégré (integrated composite) de personnes, de produits et de processus qui réalisent une aptitude (capability) à satisfaire un besoin défini ou un objectif* ».

2.1. L'IEEE 1220 Standard for the Systems Engineering Process

Pour le standard l'IEEE-1220-1998, un **système** est un ensemble ou un arrangement d'éléments [personnes, produits (matériels et logiciels) et processus (moyens et aménagements, équipements, matériels et procédures)] qui sont en relation et dont le comportement répond aux besoins des clients, aux besoins opérationnels et qui permettent le maintien des produits pendant tout le cycle de vie.

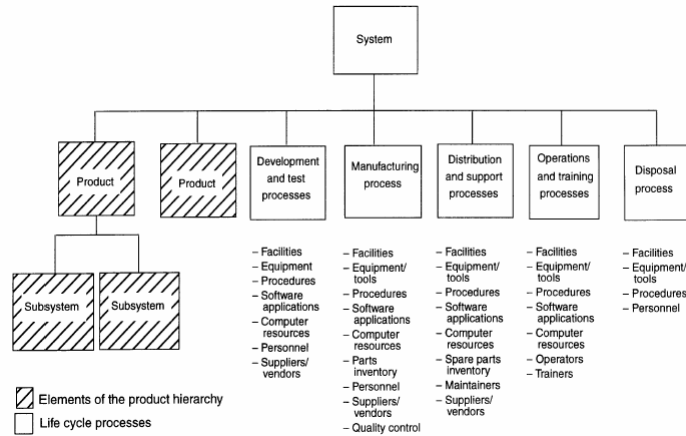


Figure 2.1. Le concept de système selon IEEE 1220.

Cette vision autorise une décomposition d'un système en sous-systèmes pouvant être également considérés à leur tour comme des systèmes à part entière et ce autant que de besoin.

2.2. EIA-632 Processes for Engineering a System

2.2.1. Produits finals et produits supports

Pour le standard EIA-632-1999, un **système** est un agrégat de *produits finals* et de *produits supports* destinés à réaliser un objectif donné.

Un **produit final** est une part d'un système qui réalise des fonctions opérationnelles et qui est livrée à l'acquéreur.

Un **produit support** est un item qui fournit les moyens de mettre en service un produit final, de le maintenir en service ou encore de le retirer du service. Les produits supports sont relatifs aux processus associés : développement, production, essais, déploiement, formation, support et retrait du service.

2.2.2. Building blocks

De plus, le standard EIA 632 introduit une notion très intéressante qu'on ne trouve pas dans les deux autres standards, celle de «building block» (blocs de construction). Nous nous appuyerons sur cette notion dans le cadre de nos propositions sur la conception de systèmes.

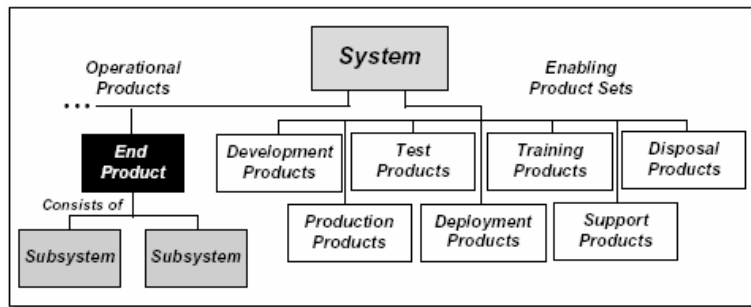


Figure 2.2. Le concept de building block selon EIA-632.

Selon EIA 632, un «building block» est composé d'un système (en gris sur la figure) décomposé en un ou plusieurs produits finals (en noir) et pour chaque produit final en un ensemble de produits supports (en blanc). Chaque produit final est à son tour décomposé en au moins deux sous-systèmes (en gris). La notion de «building block» joue un rôle central dans l'architecture de l'EIA 632, puisque :

- d'une part, c'est par rapport à un «building block» que se définit l'ensemble des processus d'ingénierie de l'EIA 632 (voir ci-dessous à la section 3.2.2.)
- d'autre part, la figure du «building block» est une figure qui peut être reproduite de proche en proche pour prendre en compte des systèmes d'importance quelconque.

La notion de «building block» vaut aussi bien pour les produits finals et leur ingénierie que pour les produits supports et leur ingénierie.

2.3. ISO 15288 System Life Cycle Processes

Dans son annexe D, la norme ISO 15288, publiée en 2002, définit un **système d'intérêt** (system of interest) comme un système produit par des humains, créé et utilisé pour fournir des services dans des environnements définis pour le bénéfice d'utilisateurs et d'autres parties prenantes.

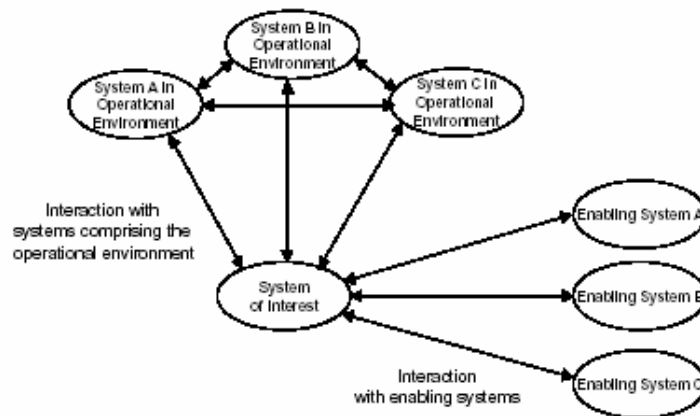


Figure 2.3. Un système, son environnement opérationnel et ses systèmes support selon ISO 15288.

Ces systèmes sont composés d'un ou plusieurs matériels, logiciels, processus associés, procédures, installations et entités naturelles. En pratique, ils sont pensés comme des produits ou des services. Ce système d'intérêt peut être en interaction :

- d'une part avec d'autres systèmes qui appartiennent à l'environnement opérationnel du système d'intérêt,
- et d'autre part avec des systèmes support (**enabling systems**) qui n'appartiennent pas directement à cet environnement

2.4. Les systèmes selon l'INCOSE

La définition de ce qu'est un système a fait l'objet, au sein de l'INCOSE ([INCOSE Fellows Consensus on SE](#)), du consensus suivant :

Un système (auquel s'intéresse l'INCOSE) est « une construction ou une collection de différents éléments qui produisent ensemble des résultats non accessibles par les éléments seuls. Les éléments ou parties peuvent inclure des personnes, du matériel, du logiciel, des installations, des politiques et des

documents, c'est-à-dire tout ce qui est requis pour produire les résultats du niveau système. Les résultats incluent les qualités, les propriétés, les fonctions, le comportement et les performances. La valeur ajoutée par le système pris comme un tout, au delà de celle procurée indépendamment par les parties, est principalement créée par les relations entre parties, c'est-à-dire par la façon dont elles sont interconnectées » (Rechtin 2000).

Si cette définition insiste bien sur l'irréductibilité d'un système à ses parties, sur l'origine relationnelle des propriétés émergentes du système, elle se limite clairement aux systèmes artificiels concrets construits en fonction d'un résultat à atteindre. En revanche, les notions de qualités, propriétés, fonctions, comportement et performance restent inexplorées.

Chapitre 3

L'ingénierie des systèmes selon trois standards différents

Dans ce chapitre nous nous proposons de faire une présentation de ce qu'il est convenu d'appeler 'l'ingénierie de systèmes' en nous référant toujours aux mêmes standards.

3.1. Les processus d'ingénierie selon IEEE 1220

3.1.1. *Les objectifs de IEEE 1220*

L'IEEE 1220 se présente comme un guide pour le développement d'un produit permettant d'assurer que le produit sera convenablement conçu pour rendre (économiquement) intéressante sa production, sa possession, son utilisation, sa maintenance et éventuellement son retrait, sans induire des risques inacceptables sur la santé ou l'environnement.

A cet effet, il définit le **Processus d'Ingénierie de Système** comme un ensemble de tâches interdisciplinaires requises, tout au long du cycle de vie d'un système, pour transformer des besoins utilisateur, des exigences et des contraintes en un système solution. Le processus d'ingénierie de système se déroule dans un environnement de projet au sein duquel il est en interaction avec des processus physiques de fabrication et d'essais. Cet environnement projet est lui-même inclus dans un environnement entreprise qui dote le projet d'un ensemble de ressources et lui impose également des contraintes. Enfin, à troisième niveau, l'environnement entreprise est immergé dans un environnement plus vaste qui comprend des acquéreurs potentiels auxquels s'adressent les produits développés par l'entreprise mais aussi des tiers venant réglementer les échanges entre acquéreurs et fournisseurs, les modes de production chez les fournisseurs et d'utilisation chez les acquéreurs.

3.1.2. *Les processus d'ingénierie selon IEEE-1220*

Le processus d'ingénierie de systèmes comprend selon IEEE 1220 huit groupes d'activités incluant des activités interdisciplinaires :

- **Analyse des exigences** permettant de constituer un référentiel d'exigences (baseline),
- **Vérification des exigences** permettant de valider le référentiel d'exigences précédemment constitué,
- **Analyse fonctionnelle** permettant de définir une architecture fonctionnelle du système,
- **Vérification fonctionnelle** permettant de vérifier l'architecture fonctionnelle du système précédemment défini,
- **Synthèse** permettant de définir une architecture physique du système,

- **Vérification de la conception** permettant de vérifier l'architecture physique du système précédemment défini,
- **Analyse système** permettant de faire toutes les études de compromis et d'évaluation aux trois niveaux identifiés (exigences, fonctionnel, physique), de proposer des arbitrages et des alternatives,
- **Contrôle** permettant de contrôler et d'ajuster les différentes interactions entre les différentes activités.

Ces activités sont figurées sur le schéma ci-dessous :

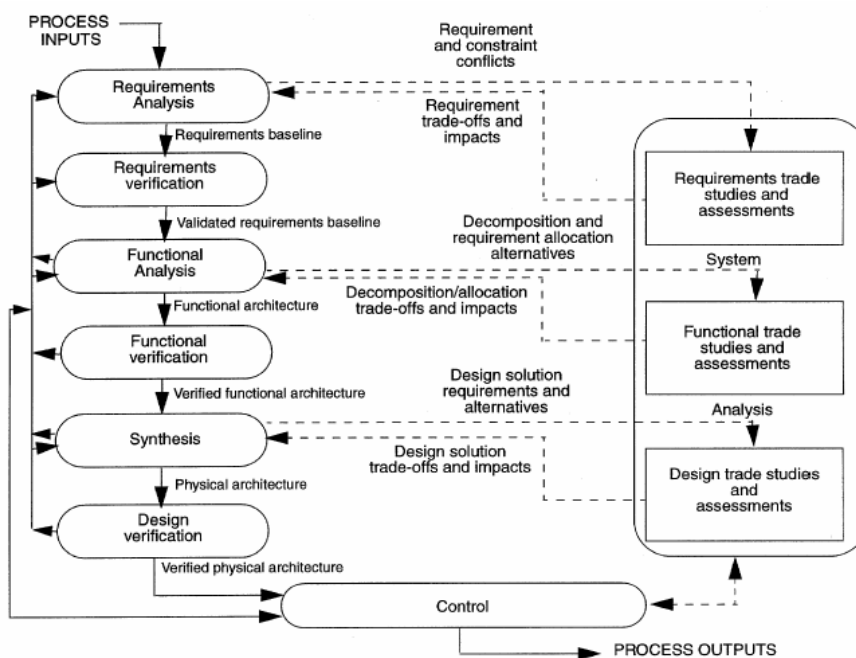


Figure 3.1. Les processus d'ingénierie de systèmes selon IEEE 1220.

3.1.2.1. L'analyse des exigences

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus d'analyse des exigences dont le but est d'établir :

- ce que le système doit être capable d'accomplir,
- ce que les produits du système devraient réaliser en de termes quantitatifs et mesurables,
- les environnements dans lesquels les produits du système opèrent,
- les exigences d'interface homme/système,
- les caractéristiques physiques et esthétiques,
- les contraintes qui affectent les solutions de conception.

Les besoins du marché, les exigences et les contraintes sont dérivés des attentes des clients, des contraintes du projet et de l'entreprise, des contraintes externes et des exigences de système de plus haut niveau.

Ces exigences sont documentées dans un référentiel d'exigences. Ce référentiel d'exigences guide le reste des activités du SEP et représente la définition du problème qui est à résoudre. En outre, le standard fixe notamment la définition des concepts suivants :

- **Exigence (Requirement)** : Enoncé qui identifie une caractéristique (opérationnelle, fonctionnelle, de conception) d'un produit ou d'un processus de manière non ambiguë, testable

ou mesurable et nécessaire pour rendre le produit ou le processus acceptable par des parties prenantes.

- **Spécification** : Document qui décrit complètement un élément de conception ou ses interfaces en termes d'exigences (caractéristiques fonctionnelles, de performances, contraintes et de conception) ainsi que les conditions et procédures de qualification de chacune des exigences.
- **Mesures de performance technique (Technical performance measure-TPMs)** : Indicateurs clé relatifs aux performances du système qui, s'ils ne sont pas atteints font courrir au projet des risques en termes de performances, de coûts ou de délais.
- **Mesures de effectivité ((Measure of effectiveness-MOEs)** : Métriques qui permettront à un client de mesurer sa satisfaction vis-à-vis des produits produit par un effort technique.
- **Mesures de performance (Measure of performance-MOPs)** : Mesure de performance d'ingénierie qui produit des exigences de conception nécessaires à la satisfaction d'une MOE. Il y a généralement plusieurs MOP pour chaque MOE.
- **Effectivité du système (System effectiveness)** : Mesure de l'aptitude d'un système à satisfaire ses utilisations opérationnelles désirées comme une fonction de la manière dont le système se comporte dans des conditions d'environnement définies ainsi que la facilité à produire, essayer, distribuer, exploiter, maintenir, former et démanteler le système pendant toute la durée de sa vie.
- **Structure de décomposition du système (System Breakdown Structure - SBS)** : Hiérarchie d'éléments, de processus associés et de personnel destinés aux équipes de développement, à la conduite des revues techniques et au partage des travaux et ressources allouées à toutes les tâches nécessaires pour atteindre les objectifs du projet. Elle fournit une base pour le suivi des coûts et le pilotage.

3.1.2.2. La vérification des exigences

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus de vérification des exigences dont le but est de valider le référentiel des exigences établi pendant l'analyse des exigences. La validation consiste en deux types d'activités :

- Evaluation du référentiel des exigences afin de s'assurer qu'il représente bien les attentes identifiées de l'utilisateur, du projet, de l'entreprise et les contraintes externes,
- Evaluation du référentiel des exigences afin de déterminer si le spectre complet des mises en opération possibles du système et les concepts de maintenance du système ont été correctement pris en compte.

Tant que des oublis sont identifiés, des besoins incorrectement pris en compte sont détectés, les processus d'analyse des exigences et de vérification des exigences sont à répéter jusqu'à l'obtention d'un référentiel validé. Le référentiel des exigences validées est documenté et constitue un point d'entrée de l'analyse fonctionnelle.

3.1.2.3. L'analyse fonctionnelle

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus d'analyse fonctionnelle dont le but est d'atteindre les deux objectifs suivants :

- Clarifier et détailler le problème défini par l'analyse des exigences,
- Décomposer les fonctions du système en fonctions de plus bas niveau qui devront être prises en charge par des éléments de conception du système (par exemple, des sous-systèmes, des composants, ou des pièces).

Ces objectifs sont atteints en traduisant le référentiel des exigences validées en une architecture fonctionnelle. L'architecture fonctionnelle décrit des arrangements fonctionnels, le séquençement des sous fonctions résultant de la décomposition de l'ensemble des fonctions système en sous fonctions. Cette analyse fonctionnelle devrait être réalisée sans préjuger de la solution de conception qui sera envisagée

en synthèse. Alors que le standard omet de fixer une définition pour le terme « fonction », il fixe notamment la définition des concepts suivants :

- **Exigence fonctionnelle (functional requirement)** : Énoncé qui identifie ce que le produit ou le processus doit accomplir pour produire le comportement et/ou atteindre les résultats visés.
- **Architecture fonctionnelle (functional architecture)** : Arrangement de fonctions et de leurs sous fonctions et interfaces (internes et externes) qui définit, l'exécution, le séquençement, les conditions des flux de contrôle ou de données, ainsi que les exigences de performance pour satisfaire le référentiel des exigences.
- **Allocation** : Décision d'assigner une fonction ou une décision à un matériel, un logiciel ou un opérateur. L'allocation d'une fonction ou d'une décision peut être soit entièrement faite sur un de ces trois types de composants (HW, SW, humain), soit sur un mix des trois à déterminer ultérieurement dans le cadre de la décomposition fonctionnelle.

3.1.2.4. *La vérification fonctionnelle*

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus de vérification fonctionnelle dont le but est d'évaluer l'exhaustivité de l'architecture fonctionnelle tout en satisfaisant au référentiel des exigences validées et de produire une architecture fonctionnelle vérifiée en entrée du processus de synthèse.

3.1.2.5. *La synthèse*

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus de synthèse dont le but est de concevoir des solutions de conception et d'identifier des sous-systèmes qui satisfassent les exigences de l'architecture fonctionnelle vérifiée. La synthèse traduit l'architecture fonctionnelle en une architecture de conception qui fournit un arrangement d'éléments du système, leurs décompositions, les interfaces (internes et externes) et des contraintes de conception. Les activités de synthèse impliquent le choix d'une solution préférée à partir d'un ensemble d'alternatives et une compréhension des coûts, performances et risques associés. L'analyse système est destinée à l'évaluation des alternatives, l'identification, l'évaluation et la quantification des risques, la sélection d'une approche de réduction des risques et à la compréhension des impacts sur les coûts, les délais et les performances. Le standard fixe notamment la définition des concepts suivants :

- **Architecture de conception (design architecture)** : Arrangement d'éléments de conception qui définit la solution de conception d'un produit ou d'un processus du cycle de vie destinée à satisfaire l'architecture fonctionnelle ainsi que le référentiel des exigences.
- **Architecture système (system architecture)** : Composite constitué d'architectures de conception pour les produits du système et pour les processus du cycle de vie des produits.
- **Analyse de compromis (trade-off analysis)** : Évaluation analytique des options ou alternatives de conception par rapport aux performances à atteindre, aux coûts objectifs et aux facteurs qualité du cycle de vie.

3.1.2.6. *La vérification de la conception*

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus de vérification de la conception dont le but est d'assurer que

- Les exigences de niveau inférieur de l'architecture de conception, y compris les exigences dérivées, sont traçables à partir de l'architecture fonctionnelle vérifiée, et,
- L'architecture de conception satisfait les exigences du référentiel des exigences validées.

3.1.2.7. *L'analyse système*

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus d'analyse système dont le but est de résoudre les conflits identifiés au cours de l'analyse des exigences, de résoudre les conflits identifiés au cours de la décomposition fonctionnelle des exigences, de l'allocation des exigences de performance durant l'analyse fonctionnelle, d'évaluer l'efficacité des alternatives de conception et de sélectionner la meilleure

conception durant la synthèse, d'évaluer l'effectivité du système et de gérer les facteurs de risque pendant toute la durée de l'effort d'ingénierie du système. L'analyse système produit une base quantitative rigoureuse pour établir un ensemble équilibré d'exigences et pour le transformer en une conception équilibrée

3.1.2.8. *Le contrôle*

Le standard IEEE 1220 définit un sous processus de contrôle dont le but est de gérer et documenter les activités relatives au processus d'ingénierie de système. Les sorties et résultats d'essais, le plan pour conduire les activités du processus d'ingénierie de système (plan d'ingénierie, échéanciers maître et détaillés), plans techniques produits par les activités d'ingénieries spécialisées doivent être contrôlés. Les tâches de contrôle fournissent :

- Une image complète et à jour des activités d'ingénierie système et de ses résultats qui servent à d'autres activités,
- Un plan et des entrées pour de futures mises en œuvre du processus d'ingénierie de système,
- Des informations à destination de la production, des essais et du support,
- Des informations à destination des décideurs lors des revues techniques et de projet.

3.2. Les processus d'ingénierie selon EIA 632

Les auteurs de ce standard affirment qu'il a été conçu « *pour permettre aux entreprises d'améliorer leur compétitivité sur les marchés globaux en développant et en produisant des systèmes de qualité, en fournissant ses produits à temps et à un prix ou à un coût intéressant.* » et que « *ses centres d'intérêt sont la conceptualisation, la création et la réalisation de systèmes et des produits qui le composent.* ». Il a le projet de « *définir ce qu'il faut faire en ce qui concerne les processus d'ingénierie d'un système* ».

Le standard définit une approche systématique de l'ingénierie ou de la ré ingénierie d'un système, en incorporant les meilleures pratiques qui ont évolué pendant la seconde partie du XXIème siècle. L'approche telle qu'elle est définie fait trois hypothèses :

- Un système est composé d'un ou plusieurs *produits finals (end products)* et d'ensembles de *produits supports (enabling products)* associés qui permettront aux produits finals de répondre aux besoins et attentes des *parties prenantes (stakeholders)* pendant tout leurs cycle de vie d'utilisation.
- Les produits sont des composites intégrés d'éléments hiérarchiques intégrés, les «**building blocks**» (voir section 2.2.2.), de telle sorte qu'ils répondent aux exigences définies des parties prenantes.
- L'ingénierie d'un système est réalisée en appliquant un ensemble de processus à chaque élément de la hiérarchie («building block») du système par une équipe multidisciplinaire composée de personnes qui ont la connaissance et les compétences requises.

L'approche systématique de ce standard est applicable :

- A la réalisation d'actions correctives,
- Au développement de systèmes dérivés,
- A la production de modifications,
- A la mise à jour de produits existants,
- A la création et à la réalisation de nouveaux systèmes,
- Au retrait sûr et économique du système

Cette approche est appliquée de manière incrémentale dans le cadre d'un cycle de vie d'ingénierie qui peut être réalisé pendant une ou plusieurs phases du cycle de vie de l'entreprise (par exemple, pendant la production, les opérations, la maintenance ou le retrait du service).

3.2.1. Les objectifs de l'EIA-632

Le propos de ce standard est de fournir un ensemble intégré de processus fondamentaux pour aider un développeur dans ses activités d'ingénierie ou de ré ingénierie d'un système en lui permettant :

- D'établir et de faire évoluer un ensemble complet et cohérent d'exigences qui permettront de livrer des solutions de systèmes faisables et économiques,
- De satisfaire les exigences dans le cadre de contraintes de coûts, de planning et de risques,
- De fournir un système ou une partie d'un système qui satisferont les parties prenantes durant la vie des produits qui constituent le système,
- De fournir des moyens sûrs et/ou économiques de dépose et de retrait du service d'un système.

Ce standard est conçu pour être applicable à l'ingénierie et à la réingénierie :

- De systèmes commerciaux ou non commerciaux et d'une partie d'entre eux,
- De n'importe quel système, petit ou grand, simple ou complexe, à logiciel prépondérant ou non, ayant ou non des prédécesseurs.
- De systèmes contenant des produits fait de matériel, de logiciel, de personnel, d'installations, de données, de matériaux, services, techniques ou processus (ou combinaison d'entre eux)
- D'un nouveau système ou d'un système hérité ou de portions d'entre eux.

Le standard a été conçu de telle sorte que l'entreprise établisse sa politique et ses procédures à partir du standard afin que les projets de l'entreprise puissent réaliser les processus du standard qui on été adoptés. De ce fait le standard ne spécifie ni le détail du comment réaliser les processus d'ingénierie d'un système ni les méthodes et les outils que le développeur devrait utiliser pour réaliser les processus mais prévoit que le développeur devra sélectionner et définir les méthodes et outils qui seront applicables au développement et qui sont cohérent avec la politique et les procédures de l'entreprise. En d'autres termes, il ne spécifie pas les moyens de réaliser ces processus mais les exigences que doivent satisfaire les réalisations de ces processus généraux. Il ne spécifie pas non plus le nom, le format, le contenu, la structure et le support de la documentation.



Figure 3.2. Les étapes du processus d'application du standard EIA-632

3.2.2. Les processus d'ingénierie selon EIA-632

Un **processus** est un ensemble de tâches interdépendantes qui, ensemble, transforment des entrées en des sorties. L'EIA-632 distingue cinq catégories de processus d'ingénierie comme le présente le schéma ci-dessous. Pour chacune de ces catégories et chaque processus défini au sein d'une catégorie, le standard définit des exigences. Ces exigences sont les exigences que doivent satisfaire les processus utilisés pour réaliser l'ingénierie d'un système et sont applicables au développement de tous les produits quelque soient leur place dans la structure hiérarchique du système ou la phase du cycle de vie défini par l'entreprise.

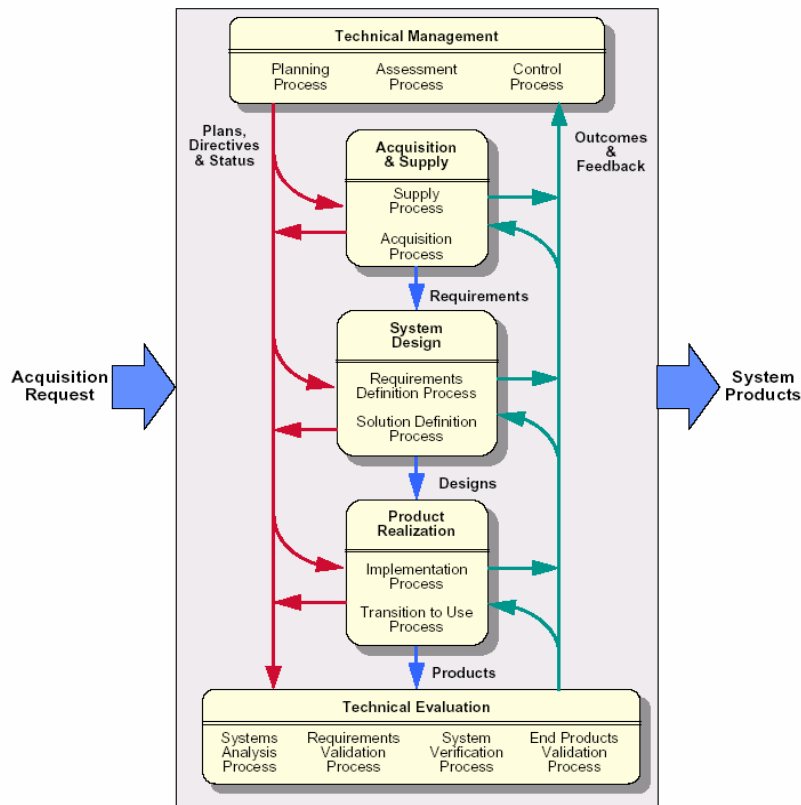


Figure 3.3. Les processus d'ingénierie de systèmes selon EIA-632

3.2.2.1. Les processus d'acquisition - fourniture

Ces processus sont utilisés par un développeur pour conclure un accord avec une autre partie prenante en vue de réaliser ou de faire réaliser un travail spécifique et de délivrer ou de recevoir les produits attendus. Les parties peuvent être ou non au sein d'une même entreprise, organisation fonctionnelle ou équipe de projet.

3.2.2.2. Les processus de gestion technique

Les processus de gestion technique sont utilisés pour planifier, évaluer et contrôler les efforts techniques requis pour satisfaire l'accord passé. Le processus de planification est utilisé pour aider l'entreprise et le projet à prendre ses décisions et à préparer les plans techniques nécessaires qui supporte et complète les plans projet pour :

- arriver à la décision de fournir des services en relation avec des sollicitations externes,
- déterminer s'il convient de développer un nouveau produit ou d'améliorer un produit existant,
- guider les efforts vers les exigences d'un accord conclu
- replanifier les processus pour d'ingénierie d'un système

Le processus d'évaluation est utilisé pour :

- Déterminer l'avancement de l'effort technique vis-à-vis du plan et des exigences,
- Evaluer l'avancement lors de revues techniques,
- Fournir une aide au contrôle et au pilotage de l'ingénierie d'un système.

Les métriques, relatives au produit et au processus, choisies pour évaluer l'avancement devrait fournir des informations pour l'évitement des risques, les performances financières ou non, et l'aide à la gestion de projet.

Le processus de contrôle est utilisé pour :

- Gérer la conduite et les sorties des processus d'acquisition – fourniture, de conception de systèmes, de planification et évaluation, de réalisation des produits et d'évaluation technique,
- Surveiller les écarts vis-à-vis du plan et les anomalies vis-à-vis des exigences,
- Distribuer les informations fournies et réclamées,
- Assurer les communications nécessaires.

Ce processus fournit le support à la réalisation de l'accord passé et l'assurance que les écarts et anomalies sont corrigés en réitérant les tâches appropriées.

3.2.2.3. *Les processus de conception du système*

Les processus de conception de systèmes sont utilisés pour transformer des exigences convenues avec l'acquéreur en un ensemble de produits réalisables qui remplissent les exigences de l'acquéreur et d'autres parties prenantes. Ils consistent en deux processus : la définition des exigences et la définition de la solution.

Cet effort technique commence avec l'identification, la collecte et la définition des exigences (*requirements*) de l'acquéreur (*acquirer*) et des autres parties prenantes (*other stakeholder*). Ces exigences sont transformées en un ensemble validé d'exigences techniques du système (*system technical requirements*). Les exigences techniques validées sont alors transformées en une solution de conception décrite par un ensemble d'exigences spécifiées (*specified requirements*). Les exigences spécifiées se présentent sous la forme de spécifications, de schémas, de modèles ou autres documents de conception en fonction de la maturité de la conception. Ils sont utilisés pour :

- construire, coder, assembler et intégrer les produits finals,
- vérifier les produits finals,
- obtenir des produits sur étagère (COTS),
- assigner à un fournisseur le développement de sous-systèmes.

3.2.2.4. *Les processus de réalisation des produits*

Les processus de réalisation des produits sont utilisés pour :

- convertir les exigences spécifiées et les autres caractérisations de la solution de conception soit en un produit final vérifié soit en un ensemble de produits finals en cohérence avec l'accord (passé avec l'acquéreur) et les exigences des autres parties prenantes.
- les fournir aux sites d'exploitation, sites clients ou sites de stockage convenus,
- les installer sur les sites d'exploitation convenus ou à l'intérieur des plateformes convenues,
- fournir les services de support comme convenu dans l'accord (avec l'acquéreur).

3.2.2.5. *Les processus d'évaluation technique*

Les processus d'évaluation technique sont destinés à être invoqués par l'un des autres processus d'ingénierie des systèmes. Quatre processus d'évaluation technique sont définis par l'EIA-632 : l'analyse des systèmes, la validation des exigences, la vérification du système et la validation des produits finals

L'**analyse des systèmes** est utilisée pour :

- Fournir une base rigoureuse à la prise de décision technique, à la résolution des conflits d'exigences, à l'évaluation des solutions physiques alternatives,

- Déterminer les progrès dans la satisfaction des exigences techniques du système et des exigences techniques dérivées,
- Fournir un support à la gestion des risques,
- Assurer que les décisions sont prises seulement après une évaluation des effets sur les coûts, le planning les performances et les risques sur l'ingénierie ou la réingénierie du système.

La **validation des exigences** est un processus critique pour la réussite du développement et la réalisation des produits d'un système. Les exigences sont validées lorsqu'il est certain que l'ensemble des exigences considérées décrit les exigences et les objectifs d'entrée de telle sorte que les produits du système résultant peuvent remplir ces exigences et ces objectifs. Le processus de validation des exigences aide à s'assurer que les exigences sont nécessaires et suffisantes pour créer des solutions de conception capable de satisfaire le critère de sortie de la phase du cycle de vie dans lequel se déroule l'effort d'ingénierie ou de réingénierie.

La **vérification du système** est utilisée pour s'assurer que :

- La solution de conception du système est cohérente avec ses exigences d'origine,
- Les produits finals à chaque niveau de la réalisation de la structure du système à partir du niveau le plus bas remplissent les exigences spécifiées,
- le développement ou l'acquisition des produits supports associés à chaque processus progressent correctement,
- les produits supports requis seront prêts et disponibles lorsqu'on en aura besoin.

La validation des produits finals est utilisée pour démontrer que les produits à livrer ou qui ont été livrés remplissent les exigences validées de l'acquéreur qui étaient convenues en entrée des processus de conception de systèmes et qui sont applicables aux produits finals qui en résultent.

3.2.3. Processus d'ingénierie et building blocks

Le schéma ci-dessous représente l'articulation entre la dimension dynamique des processus d'ingénierie selon EIA 632 et la dimension structurelle du système. Les processus d'ingénierie s'appliquent à chaque «building block» d'un système.

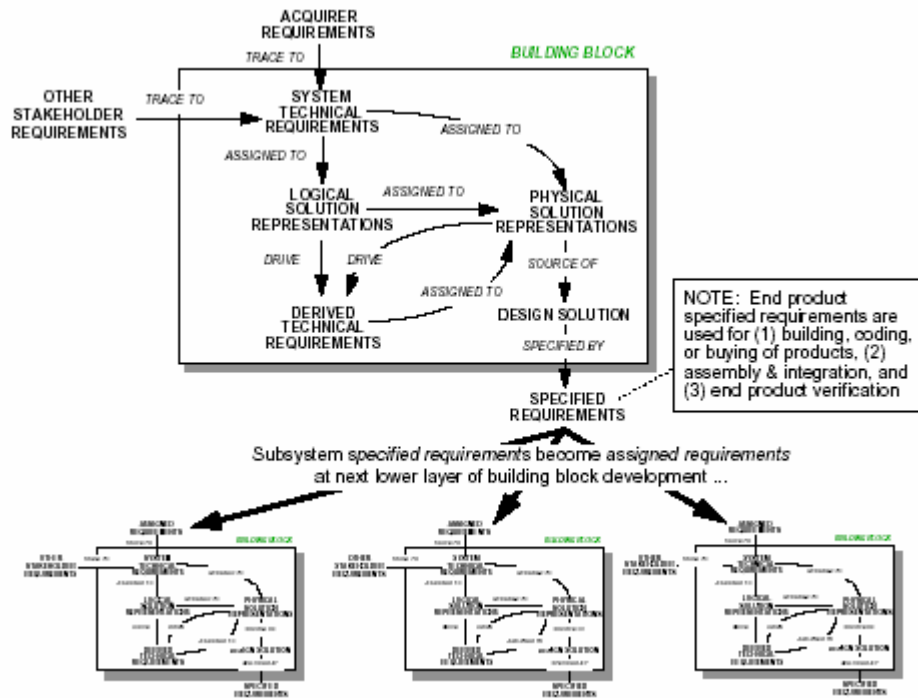


Figure 3.4. Les processus d'ingénierie et les building blocks d'un système (EIA-632)

3.3. L'ISO 15288 « Systems Engineering - System Life Cycle Processes »

Le standard international (« norme ») ISO 15288 a pour but de définir un cadre commun pour décrire le cycle de vie de systèmes créés par des humains (artefacts humains pouvant comporter du matériel, du logiciel, des processus associés, des procédures, des installations et locaux), un ensemble de processus bien définis et la terminologie associée.

Des ensembles choisis de ces processus peuvent être appliqués tout au long du cycle de vie pour gérer et réaliser les étapes du cycle de vie d'un système. Ces processus sont réalisés en impliquant toutes les parties intéressées avec comme but ultime de donner satisfaction au client. Ce standard international fournit également des processus qui permettent la définition, le contrôle et l'amélioration des processus du cycle de vie appliqués dans une organisation ou un projet. Les organisations ou les projets peuvent utiliser ce cadre lorsqu'elles ont à acquérir ou à fournir un système.

A noter qu'un guide d'application, l'ISO/IEC TR 19760 [ISO 19760 03] est associé à cette norme internationale depuis novembre 2003.

3.3.1. Les processus du cycle de vie système selon l'ISO 15288

L'ISO 15288 regroupe en quatre catégories les processus du cycle de vie d'un système :

- Les processus de contractualisation,
- les processus d'entreprise,
- les processus de projet,
- les processus techniques.

Le schéma ci-dessous offre la cartographie des processus du cycle de vie d'un système proposé par l'ISO/IEC 15288. Cette cartographie notamment fait apparaître une augmentation du nombre de processus contrôlés par rapport à ceux qui étaient déjà sous contrôle dans le cadre de l'EIA-632.

3.3.1.1. Les processus de contractualisation

Ces processus qui se nouent entre deux entités séparées l'une de l'autre (juridiquement ou organisationnellement) définissent les activités nécessaires pour établir une convention ou un contrat (agreement) entre deux organisations et consiste en processus :

- Acquisition de biens ou de services,
- Fourniture de biens ou de services

3.3.1.2. Les processus d'entreprise

Les processus d'entreprise traitent des capacités de l'entreprise à acquérir ou à fournir des produits ou des services au travers de projets. Ils fournissent les ressources et l'infrastructure nécessaire pour supporter ces projets et assurer la satisfaction des objectifs de l'organisation et le respect des conventions passées. Les processus d'entreprise couvrent la gestion de :

- l'environnement de l'entreprise,
- l'investissement
- des processus du cycle de vie des systèmes
- des ressources,
- la qualité.

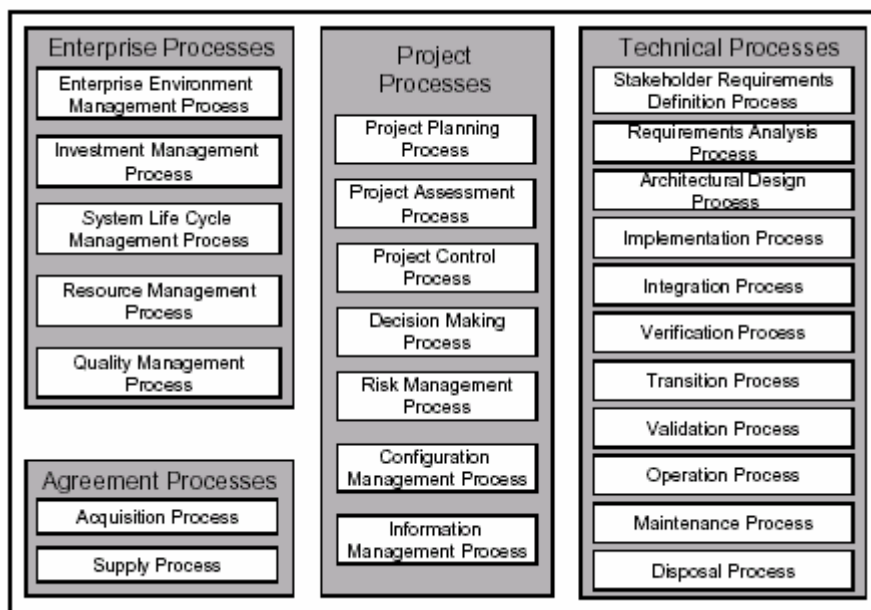


Figure 3.5. Les processus du cycle de vie des systèmes selon ISO 15288.

3.3.1.3. Les processus projet

Les processus projet sont utilisés pour établir et faire évoluer les plans projets, pour évaluer l'avancement effectif et le reste à faire par rapport aux plans et pour contrôler le déroulement du projet jusqu'à son achèvement. Ces processus sont appliqués avec d'autant plus de rigueur et de formalisme que les risques et la complexité sont importants. Les processus projet comprennent les processus de :

- Planification de projet,

- Evaluation de projet,
- Conduite de projet,
- Décision,
- Gestion des risques.

3.3.1.4. *Les processus techniques*

Les processus techniques sont utilisés pour définir le besoin pour un système et transformer ce besoin en un produit effectif, pour permettre la reproduction cohérente du produit là où c'est nécessaire, pour utiliser le produit, pour fournir les services requis, pour soutenir la fourniture de ces services et quand le produit est retiré du service pour le déposer. Les processus techniques comprennent les processus de :

- Définition des exigences des parties prenantes (définition des exigences pour un système qui rende les services attendus par les utilisateurs et les autres parties prenantes dans des environnements définis),
- Analyse des exigences (transformer la vue du système désiré produite par les parties prenantes et formulée en terme d'exigences en une vue technique d'un système produit capable de délivrer les services attendus),
- Conception architecturale (synthèse d'une solution qui satisfait les exigences système),
- Réalisation (production d'un élément spécifié du système),
- Intégration (assembler le système conformément à la conception architecturale),
- Vérification (démontrer que les caractéristiques et le comportement d'un produit est conforme aux exigences de conception spécifiées résultant du processus de conception architectural à partir duquel le produit a été réalisé),
- Transfert (établir l'aptitude à fournir les services spécifiés par les exigences des parties prenantes),
- Validation (apporter les éléments de preuve objectifs que les services fournis par le système ou par n'importe lequel de ses éléments lorsqu'ils sont en opération sont conformes aux attentes et exigences de leurs parties prenantes respectives),
- Opération (utiliser le système afin qu'il rende ses services),
- Maintenance (soutenir la capacité du système à fournir ses services),
- Démantèlement (mettre fin à l'existence d'un système).

Pour compléter ce tableau fourni par les standards, nous avons présentons en annexe 2 un ensemble de contributions relatives à l'ingénierie des systèmes techniques. Ces contributions concernent (1) PSARE, méthode de conception des systèmes développée par Hatley, Pirbhai et Hruschka dans la continuité de la méthode SA-RT qui avait fait leur renommée, (2) SAGACE, méthode développée par Jean-Marie Penalva en référence au cadre épistémologique et méthodologique défini par Jean Louis LeMoigne et (3) SysML qui nous semble promu à un bel avenir.

3.4. Comparaison des trois standards ISO 15288 – EIA 632 – IEEE 1220.

Dans les trois sections précédentes nous nous sommes efforcés de faire une présentation factuelle des trois standards majeurs qui encadrent l'ingénierie des systèmes techniques. Nous présentons un comparatif sommaire de ces trois standards et porter une évaluation personnelle sur ceux-ci.

En premier lieu, il convient de souligner que ces trois standards ne couvrent pas les mêmes phases du cycle de vie d'un système.

Si l'ISO-15288 prétend embrasser l'ensemble du cycle de vie d'un système technique, les deux autres standards ne se préoccupent que des phases de développement ou de re-développement d'un système.

Ceci ressort, par exemple, du schéma ci-dessus tiré de l'ISO-TR-19760 [ISO 19760 03], document d'accompagnement de l'ISO-15288. En outre, le schéma met en évidence un niveau de précision croissant entre les différents standards. Ainsi ISO-15288 serait un standard de premier rang (très général), l'EIA-632 de second rang (plus précis) et l'IEEE-1220 de troisième (très précis).

En second lieu, cette présentation de la position relative de chacun des trois standards crée une illusion de continuité qui n'existe pas dans les faits :

- L'ISO-15288 est en effet un standard très général. Pris isolément, il ne pourrait être mis en œuvre, en particulier, parce qu'il ne propose aucune articulation entre les différents processus les uns par rapport aux autres, ce qui nous paraît particulièrement dommageable. Il doit impérativement être complété de son guide d'application, l'ISO-TR-19760, qui lui n'a pas valeur de standard.
- Les passages de l'ISO-15288 à l'EIA-632 et de l'EIA-632 à l'IEEE-1220 comme passages de standards plus généraux vers des standards d'application, plus spécifiques ne valent qu'à la condition d'offrir des cadres conceptuels compatibles. Cette condition ne nous paraît pas totalement remplie.

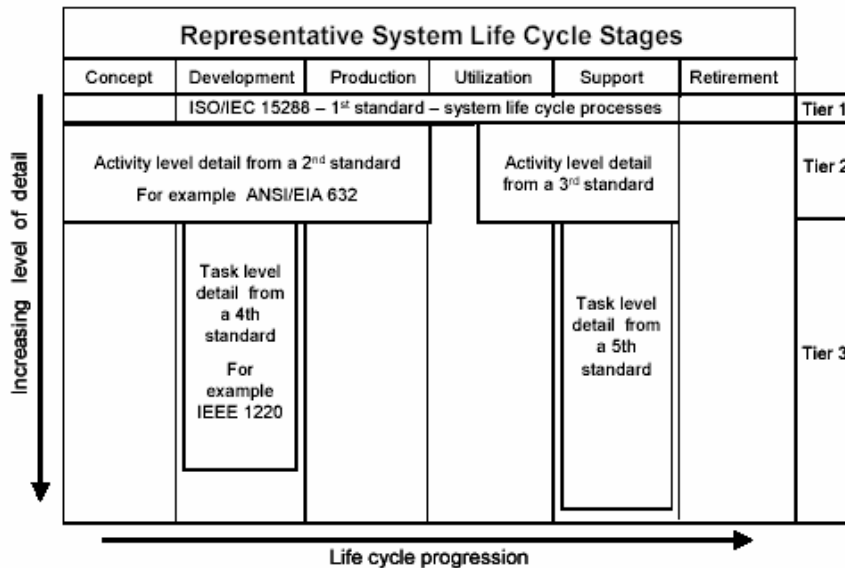


Figure 3.6. Périmètre des trois standards considérés selon ISO-TR-19760

Certes, l'appareillage conceptuel de l'ISO-15288 est suffisamment réduit pour autoriser un passage sans problème de l'ISO-15288 à l'EIA-632 ou à l'IEEE 1220. En revanche les appareils conceptuels de l'EIA-632 et de l'IEEE-1220 sont sémantiquement riches et ne sont pas réductibles l'un à l'autre :

- Les définitions que l'EIA-632 et l'IEEE-1220 donnent d'un système ne sont pas identiques,
- Le caractère architectonique du concept de « building block » dans l'EIA-632 ne peut que trancher avec celui de « building block » introduit dans l'IEEE 1220-2005 comme « pièce rapportée »,
- La distinction introduite dans l'EIA-632 entre la « vue entreprise » et la « vue ingénierie » du cycle de vie d'un système sans équivalent dans l'IEEE-1220,
- la distinction introduite dans l'EIA-632 entre les exigences (*the developer shall ..*) associées aux différents processus et la manière de satisfaire ces exigences (*the developer should ..*) est également sans équivalent dans l'IEEE-1220.

En conséquence si l'IEEE-1220 apparaît comme un standard d'ingénierie d'une très grande maturité, héritier des grands standards du passé (MIL-STD 499, 499A, 499B). Il marque, à notre avis, la fin d'un cycle d'ingénierie des processus d'ingénierie, la fin d'une génération de standards d'ingénierie.

A l'opposé, l'EIA-632, par une série d'innovations remarquables (définition du système et introduction du concept de building block), distinction entre les vues ingénierie et entreprise du cycle de vie d'un système, distinction systématique entre le « shall » et le « should », et par une intégration inégalée des processus, inaugure selon nous un nouveau cycle d'ingénierie des processus d'ingénierie et par là, inaugure une nouvelle génération de standards d'ingénierie.

Chapitre 4

Analyse critique des conceptions les plus courantes et interprétations

Dans les deux chapitres précédents, nous nous sommes efforcés de rendre compte des conceptions et des notions les plus couramment utilisées par la communauté des ingénieurs système, concernant d'une part la définition (ontologie) des systèmes et en particulier des systèmes techniques (chapitre 2) et d'autre part l'ingénierie des systèmes techniques (chapitre 3).

Concernant les systèmes techniques, le courant dominant, que nous nommerons courant fonctionnaliste, propose des définitions concernant les systèmes « *produits par des humains, créés et utilisés pour fournir des services dans des environnements définis pour le bénéfice d'utilisateurs et d'autres parties prenantes* » (ISO 15288). La question de savoir comment cette catégorie de systèmes particuliers vient s'intégrer dans un ensemble plus vaste (celui des systèmes en général), n'intéresse que faiblement ce courant.

Le choix du terme 'fonctionnaliste' pour désigner ce courant nous appartient et nous le justifions par la thèse implicite que ce courant promet : un système technique est homogène à ses fonctions et est donc réductible à une description fonctionnelle.

Aux côtés de ce courant majoritaire, subsiste de manière plus marginale un courant qui se désigne comme 'systémique' et dont les centres d'intérêt ne se limitent pas aux seuls systèmes techniques mais, au contraire, visent les systèmes en général.

Lorsqu'ils sont confrontés à des questions plus larges que celles qu'ils définissent comme étant inscrites dans leur domaine de compétence, les premiers, fonctionnalistes, font alors référence aux travaux des seconds, systémistes, sans toujours analyser et mesurer la distance qui les sépare.

Dans tous les cas, l'effort de définition des concepts utilisés est toujours minimal. L'utilitarisme prime et les méthodologues ne s'attardent pas vraiment sur le statut ontologique des concepts utilisés (système, propriété, relation, interaction, exigence, fonction, modes et états, ..).

4.1. Un concept commun, le concept de fonction

4.1.1. Effets recherchés et transformations

Les deux courants que nous avons identifiés, fonctionnaliste et systémique, ont en commun le concept de fonction.

Les normes européennes (la norme [EN-1325], par exemple) introduisent les notions de « **fonction de service** » et de « fonction technique » alors que d'autres standards ([ECSS-E-10-05A 99], par exemple) distinguent des fonctions et des sous fonctions.

Pour [EN-1325], une **fonction de service** est une fonction dont l'effet est observable de l'extérieur du système alors qu'une **fonction technique** est un effet attendu d'un sous système du système, observable à l'extérieur de ce sous-système mais non observable (interne) directement au niveau du système et nécessaire à la réalisation d'une fonction de service. Cette distinction ouvre la voie à la décomposition du système en sous-systèmes.

Mais, qu'est-ce qu'une fonction pour ces courants ? Le glossaire du langage SysML, par exemple, définit une fonction de la manière suivante : il s'agit d'« une transformation d'entrées en sorties qui peut inclure la création⁶, la surveillance, la modification ou la destruction d'éléments, ou une transformation nulle » [SML 06], page 14). Dans la littérature, le terme 'transformation' ou le terme de 'processus' sont fréquemment utilisés comme synonymes du terme 'fonction'. Par exemple, Hatley [HAT 00], sur la base de cette assimilation est amené à distinguer trois sortes de fonctions à partir desquelles il va constituer une part importante de son modèle d'exigences :

- Les **fonctions de stockage** qui assurent la conservation à travers le temps de matières, de l'énergie ou d'informations,
- Les **fonctions de transport** qui assurent le déplacement dans l'espace de matières, de l'énergie ou d'informations,
- Les **fonctions de transformation** qui assurent une modification de la forme de matières, de l'énergie ou d'informations.

Cette problématique rejoint une classification admise également par le courant systémique (par exemple, [WAL 77], page 15) connue sous le nom de matrice (MEI, TEF) :

| Systèmes | Matière | Energie | Information |
|----------|----------------|----------------|---------------|
| Temps | Stockage | Accumulation | Mémorisation |
| Espace | Transport | Transport | Communication |
| Forme | Transformation | Transformation | Traitement |

Cette définition de '*fonction-transformation*' est d'autant plus ancrée qu'elle correspond exactement à ce que chacun d'entre nous a appris de la notion de fonction mathématique à savoir qu'une fonction mathématique est une correspondance f qui aux éléments x d'un domaine de définition (inputs) fait correspondre au plus un élément $f(x)$ d'un domaine de valeurs ou co-domaine (outputs).

Cette définition de fonction en tant que transformation cohabite, souvent de manière implicite et parfois de manière explicite, (par exemple, dans [ECSS-E-10-05A 99]) avec une autre définition de la notion de fonction à savoir : « *effet recherché d'un système, d'un sous système, d'un produit ou d'une pièce* ».

Cette cohabitation est explicite chez Gerhard Pahl (in [CHA 02]) où « *a function defines intended purpose in a solution neutral way* » (page 109) et où « *it is useful to use the term function for the general purpose Input-output relationship of a definite and limited system* » (page 110).

Or, selon nous, ces deux définitions de la notion de fonction ne sont absolument pas équivalentes. Dans le premier cas celui de la '*fonction-transformation*', une fonction est caractérisée par ses entrées et ses sorties comme cela est représenté sur la figure ci-dessous :

⁶ Une formulation fortement influencée par son origine (UML concerne le logiciel) et qui, à propos d'objets matériels, semble ignorer la formule de Lavoisier « Rien ne se perd, rien ne se crée tout se transforme »

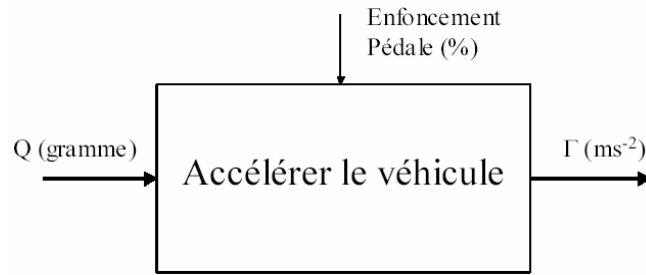


Figure 4.1. Le concept de fonction-transformation

Tandis que dans le second cas, celui de la 'fonction-effet', la fonction est caractérisée par ses seules sorties comme cela est représenté sur la figure ci-dessous :

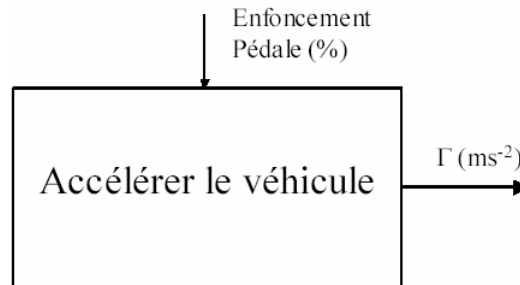


Figure 4.2. Le concept de fonction-effet recherché

Il existe donc une différence d'abstraction entre ces deux notions : la notion de 'fonction-transformation' est une **concrétisation** de la notion de 'fonction-effet' qui est elle-même une **abstraction** de la première dans la mesure où la première comporte plus de **déterminations** que la seconde ou que la seconde possède plus de **degrés de liberté** que la première.

Un exemple suffira pour l'illustrer : considérons la 'fonction-effet' « entraîner les arbres de roues d'un véhicule » (il s'agit bien de l'effet attendu d'un groupe motopropulseur, sa sortie), elle n'est pas équivalente à la 'fonction-transformation' « transformer l'énergie latente d'un carburant fossile en un mouvement d'entraînement des arbres de roues d'un véhicule » (il s'agit cette fois de la transformation d'une entrée en une sortie réalisée par un groupe motopropulseur). Dans le premier cas, on ne préjuge pas du type de moyen utilisé, le second, il s'agit nécessairement d'une machine thermique : la 'fonction-transformation' est donc plus concrète que 'fonction-effet', elle embarque avec elle des choix de conception.

Le formalisme « Integration Definition for Function Modeling » (IDEF0), basé sur SADT (Structured Analysis and Design Technique) développé par Douglas T. Ross et popularisé en France par Michel Lissandre [LIS 90] présente selon nous le même biais concernant la définition de ce qu'est une fonction. Elle est exprimée de la manière suivante : une fonction est « une activité, un processus ou une transformation (modélisée à l'aide d'une « boîte » IDEF0). Elle est identifiée par un verbe ou une forme verbale qui exprime ce qui doit être accompli ». On peut noter que la première partie de cette définition de la notion de fonction renvoie à la fonction en tant que transformation, tandis que la seconde partie (qui débute par « et elle est identifiée par un verbe .. ») renvoie à la fonction en tant qu'effet recherché. Ainsi les deux niveaux d'abstraction que nous avons distingués précédemment sont confondus en IDEF0 dans la définition même du concept de fonction dont voici, ci-dessous la représentation graphique en tant que « boîte » IDEF0.

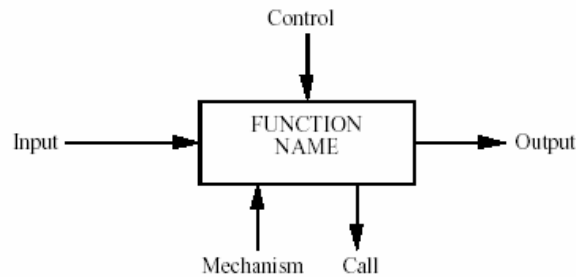


Figure 4.3. La représentation d'une fonction comme « boîte » IDEF0.

Blanchard & Fabrycky ([BLA 98], page 76) ne font pas exception à la règle en proposant une définition de la notion de fonction homogène à celle de IDEF0.

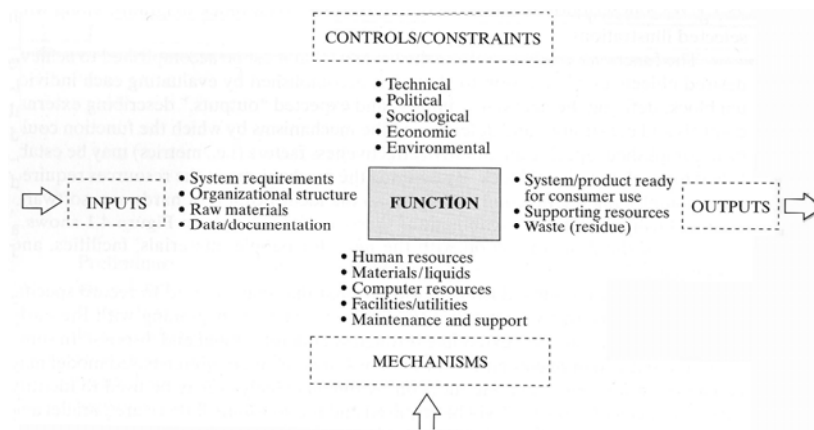


Figure 4.4. La représentation d'une fonction selon Blanchard & Fabrycky.

Il serait donc souhaitable de distinguer strictement la notion de fonction (définie comme fonction-effet) de celle de transformation (définie comme fonction-transformation) qui ne sont pas de même niveau. C'est ce que nous ferons ultérieurement.

4.1.2. Principe de décomposition : arborescences fonctionnelles

Sur la base de cette notion de fonction, indûment confondue avec celle de transformation, les standards et les méthodes de conception proposent généralement de procéder à une analyse fonctionnelle (par exemple [IEEE 1220-05]), et/ou à une conception fonctionnelle (c'est le cas de J.P Meinadier, [MEI 98], chapitre 8, page 228 et suivantes). Le résultat de cette activité d'analyse fonctionnelle est généralement présenté sous deux formes au moins:

- Les arbres fonctionnels (Function Tree) et,
- Les diagrammes de blocs fonctionnels (Functional Block Diagram).

Les arbres fonctionnels permettent de représenter sous la forme d'une décomposition hiérarchique l'ensemble des fonctions de service⁷ et des fonctions techniques⁸ d'un système. Cette forme présente

⁷ Ou encore service ou fonction du système, observable de l'extérieur.

⁸ Ou encore fonction interne du système, non observable de l'extérieur et requise pour assurer une fonction de service.

l'avantage de synthétiser de façon structurée et particulièrement lisible un nombre, souvent important d'items (fonctions).

De nombreux standards évoquent et préconisent ce mode de présentation au nombre desquels nous pouvons citer [X50-101 95], [EN-1325], [ECSS-E-10-05A 99], FAST, .etc.

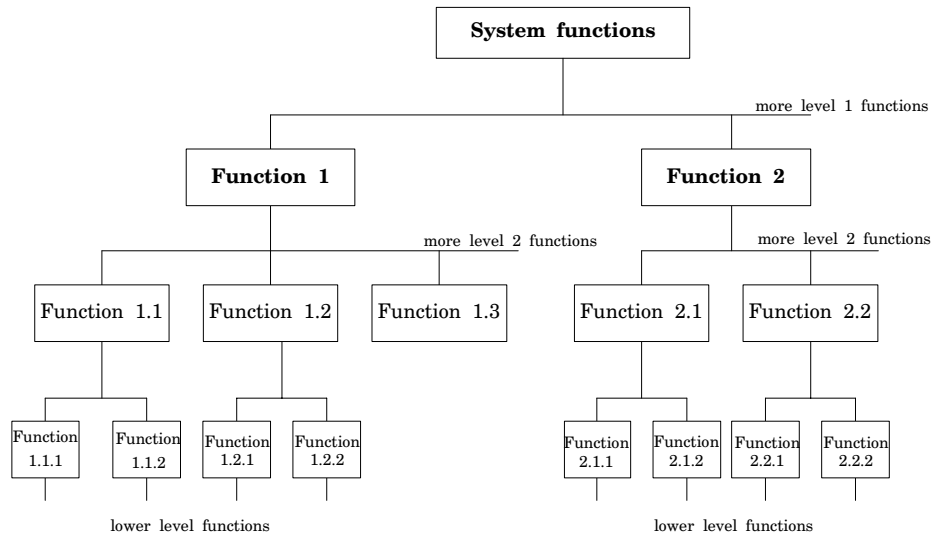


Figure 4.5. *Arbre fonctionnel.*

La seconde forme de représentation de l'analyse fonctionnelle est plus "riche" que la précédente dans la mesure où chaque niveau de décomposition est représenté dans un diagramme séparé et où les flux de matière, d'énergie et d'informations reliant les "fonctions" entre elles le sont aussi. Cette seconde forme s'apparente au formalisme IDEF0 [IDEF0 93].

Ces représentations en blocs de diagrammes fonctionnels, ont fait l'objet de multiples sophistications au nombre desquelles on peut citer :

- le formalisme SA-RT suivant ses deux modalités : Ward et Mellor [WAR 85] d'une part et Hatley et Pirbhai [HAT 88] d'autre part,
- Le formalisme des Statecharts [HAR 98],
- les Enhanced Functional Flow Block Diagrams, auxquels SysML fait référence ([SML 06], Partie III, EFFBD extensions et annexe C)

Il existe des différences notables entre ces différents formalismes. Cependant, ils partagent tous le paradigme commun de la 'fonction-transformation' (elle-même confondue avec la notion de 'fonction-effet') à partir duquel des modèles hiérarchiques multi niveaux de diagrammes fonctionnels de 'fonction-transformation' peuvent se développer.

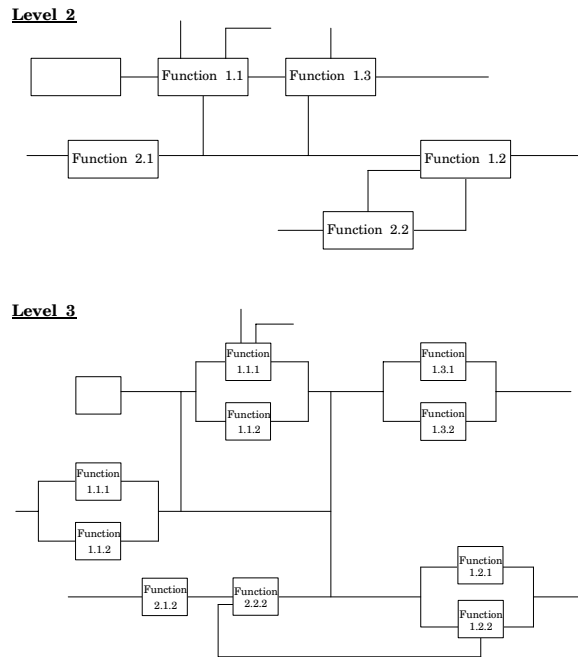


Figure 4.6. Diagrammes Blocs Fonctionnels.

Une règle de l'art voudrait que cette décomposition soit réalisée en excluant toute considération relative à la solution d'ingénierie requise pour réaliser les fonctions identifiées (par exemple, [ECSS-E-10-05A 99], page 14 ou encore [MEI 98]. C'est la règle de séparation du quoi (What) et du comment (How).

Nous considérons que cette première règle est irréaliste pour les raisons suivantes :

- l'assimilation de fait d'une fonction '*fonction-effet*' comme « entraîner les arbres de roues d'un véhicule » à une '*fonction-transformation*' comme « transformer l'énergie latente d'un carburant fossile en un mouvement d'entraînement des arbres de roues d'un véhicule » embarque implicitement un choix de conception qui passe souvent inaperçu même s'il saute aux yeux dans l'exemple choisi (dans l'exemple, une machine thermique).
- le passage d'une '*fonction-transformation*' à une chaîne de transformations entraîne implicitement des choix de conception, comme dans l'exemple suivant d'un groupe moto propulseur hybride série :
- Un arbre fonctionnel embarque implicitement de nombreux choix de conception d'autant plus nombreux que l'arbre fonctionnel est profond. De plus cet arbre est dépendant des choix de conception effectués.

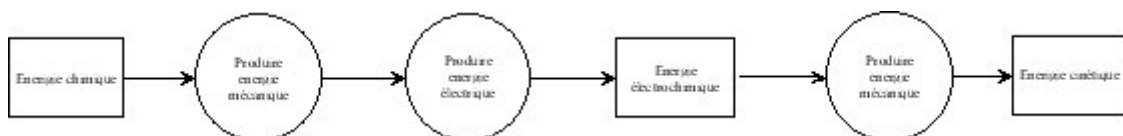


Figure 4.7. Chaîne fonctionnelle hybride série

Associée à cette première règle de l'art, une seconde règle voudrait, qu'une fois réalisée l'analyse (ou la conception) fonctionnelle, on alloue les fonctions identifiées lors de l'analyse (la conception) fonctionnelle à des processeurs physiques organisés dans une conception physique (par exemple, [ECSS-E-10-05A 99], ou encore [MEI 98]).

Nous considérons que cette seconde règle est tout aussi irréaliste que la précédente :

- l'arbre fonctionnel d'un système n'est pas indépendant des choix de conception effectués mais au contraire très directement lié à ceux-ci,
- A rebours de cette vision disjointe de l'analyse fonctionnelle et de la conception physique, il existe un incessant mouvement de va et vient entre le fonctionnel et le physique comme le souligne [HAT 00] ou comme Apte y fait allusion [BRE]. C'est également ce que traduit le mouvement zigzagant (zigzagging) préconisé par Nam Suh [SUH 01].

Pour conclure, si nous revenons à la norme [EN 1325] , elle signale que la déclaration d'une fonction technique peut capturer un choix technologique effectué par le concepteur, c'est-à-dire indiquer dans la désignation d'une fonction technique plus ou moins explicitement une « voie technologique » choisie. Nous pensons que ce dernier point (l'indication d'une voie technologique dans la déclaration d'une fonction technique), qui répond à la nécessité de donner un contenu concret à l'analyse fonctionnelle, constitue un défaut important dans la conduite de cette analyse pour les raisons suivantes :

- L'indication d'une voie technologique dans la déclaration d'une fonction technique rend contradictoire l'expression « fonction technique » (premier terme : fonction = action d'un système qui ne préjuge pas de la façon dont cette action est réalisée, second terme : une fonction technique peut indiquer la voie technologique utilisée).
- Dès l'instant où une fonction technique dénote la voie technologique choisie, la décomposition d'une fonction de service en fonctions techniques n'est plus unique. Des décompositions en fonction techniques alternatives à la première sont possibles. On a donc dans la décomposition d'une fonction de service en fonctions techniques une multiplicité de solutions envisageables que l'analyse fonctionnelle ne prend en charge d'aucune manière.
- Au contraire, l'indication d'une voie technologique dans la déclaration d'une fonction technique masque l'espace des solutions envisageables dans la conception du procédé mis en œuvre pour réaliser la fonction technique en le réduisant à un élément unique, la voie technologique choisie.
- L'indication d'une voie technologique dans la déclaration d'une fonction technique ferme la voie à la justification des choix de conception qui devrait être un examen raisonné des différentes alternatives de conception permettant de réaliser une fonction et à un choix parmi ces différentes alternatives.

Il serait donc souhaitable de formaliser et de représenter de façon adéquate les incessants mouvements d'aller-retour qui ont lieu, lors des processus entrelacés de conception fonctionnelle et physique, entre trois espaces distincts : espace des fonctions ou plutôt des effets (recherchés ou non), espace des transformations et espace des processeurs.

4.1.3. Effets recherchés et effets concomitants

Aucune des méthodes de conception des systèmes que nous avons eu l'occasion d'examiner soit dans le cadre de notre pratique professionnelle soit dans celui de ce travail n'accorde une existence explicite à ce que nous nommons ici les **effets concomitants**.

Lorsqu'un moteur à combustion interne d'un véhicule automobile travaille, c'est-à-dire transforme de l'énergie latente, stockée sous forme chimique, d'un carburant en un travail mécanique, il agit sur un récepteur, le véhicule, et produit un **effet** mécanique sur le véhicule, son déplacement. Cet effet, « *Produire l'énergie motrice du véhicule* », est d'ailleurs un effet recherché, une **fonction** du moteur.

Cependant cet effet est loin d'être le seul effet produit par le système matériel qu'est le moteur à combustion interne. Comme chacun le sait, il va nécessairement produire de la chaleur non convertible en travail mécanique, comme nous l'enseigne le second principe de la thermodynamique. Cet effet, « *Produire de la chaleur non convertible en travail mécanique* », n'est sûrement pas un effet recherché

du moteur à combustion interne⁹. S'il avait pu en être autrement, nous aurions été preneurs. Cet effet n'est donc évidemment pas une fonction¹⁰, mais un effet subi du moteur à combustion interne.

Les systèmes techniques produisent donc des effets autres que des effets recherchés (fonctions). Nous appelons ces effets des **effets concomitants**, c'est-à-dire « des effets qui vont avec (les effets recherchés) »¹¹. Ainsi, pour un moteur à combustion interne, le fait de « *Produire de la chaleur non convertible en travail mécanique* » est un effet concomitant de l'effet recherché « *Produire l'énergie motrice du véhicule* ». Il est impossible de produire le premier effet sans produire le second.

Au demeurant, cet effet n'est pas le seul effet concomitant produit par un moteur à combustion interne lorsqu'il produit de l'énergie motrice pour un véhicule. Parmi les autres effets non recherchés que le moteur à combustion interne va entraîner, nous pouvons citer :

- La production de gaz de combustion, des gaz à effet de serre (CO₂), des gaz polluants (CO, NO_x, ..), les résidus d'une combustion incomplète (COV, particules),
- La production de vibrations, de chocs et de bruits et autres pertes mécaniques.

Ces deux derniers effets concomitants, loin d'être recherchés sont au contraire des effets indésirables.

Les motoristes vont travailler à réduire ces effets indésirables au moyen de deux grandes catégories d'actions :

- En traitant les causes, par des actions de **prévention**¹² de l'effet indésirable (réduction de la consommation de carburant, suppression du plomb et d'autres additifs dans les essences, ..),
- En traitant les conséquences, par des actions de **tolérance**¹³ de l'effet indésirable (recirculation des gaz d'échappement, pot catalytique, filtre à particules),

Ainsi, un système technique produit des effets, certains d'entre eux sont recherchés, ce sont ce que l'on nomme habituellement les fonctions, d'autres sont concomitants, c'est-à-dire qu'ils vont avec les effets recherchés. Ce sont des effets non désirés. Parmi ces effets concomitants, certains peuvent nous être indifférents bien que non désirés, ils passent souvent inaperçus, d'autres, au contraire, peuvent être considérés indésirables voir nuisibles. Ils requièrent, par conséquent, de longues heures de travail.

Les systèmes techniques sont donc des **systèmes imparfaits**, sous deux aspects principaux :

- **Par excès** : ils ne peuvent être réduits aux seules fonctions que l'on attend d'eux. Au contraire, ils excèdent la vision idéale (fonctionnelle) que l'on porte sur eux par toutes sortes d'effets non recherchés indifférents ou indésirables,
- **Par défaut** : car ils sont dans l'incapacité de réaliser les fonctions que l'on attend d'eux, avec le niveau de performance espéré, sans produire également des **pertes** (usures et vieillissement, pertes thermiques entre autres, ..)

De ce point de vue, les systèmes techniques diffèrent des systèmes logiciels. Ces derniers peuvent être réduits au plan conceptuel aux seules propriétés attendues d'eux, ce qui ne nous paraît pas possible pour les systèmes techniques concrets.

⁹ Ce constat n'interdit pas une attitude « opportuniste » vis-à-vis d'effets non recherchés. Ainsi la chaleur non convertible en travail mécanique peut être utilisé pour chauffer l'habitacle d'un véhicule.

¹⁰ A moins de faire marcher les mots sur la tête et d'inventer, par exemple, l'expression de fonction non recherchée ou de fonction indésirable. Limite que franchit la norme [DO 254] qui parle de fonction non recherchée (unintended function) !

¹¹ (Con)comitant du latin *cumeo* : aller avec. C. Castoriadis fait remarquer que le mot concomitant est pléonastique, comitant voulant dire aller avec, le préfixe (con) est rédundant.

¹² Comme on dit action de prévention d'un risque en gestion des risques

¹³ Comme on dit action de tolérance d'un risque en gestion des risques

Nous attribuons cette différence au caractère strictement formel des systèmes logiciels et à la matérialité des systèmes techniques. Nous interprétons la cécité des méthodes d'ingénierie (comme par exemple celles de l'analyse fonctionnelle) vis-à-vis des effets concomitants comme le résultat d'une transposition inadéquate des méthodes du génie logiciel au génie système.

Une bonne part de l'effort consacré à l'ingénierie d'un système technique est dédiée à la réduction, sinon à la suppression, des effets indésirables concomitants aux effets recherchés du système. Il serait souhaitable que les méthodes d'ingénierie de systèmes donnent une visibilité et des moyens suffisants de traitement des effets indésirables.

4.2. Les infortunes de l'ingénierie de systèmes

4.2.1. Un exemple, le désastre de la constellation Iridium

Le réseau Iridium a été lancé par un consortium emmené par Motorola à la fin des années 90, avec le slogan « Le premier réseau cellulaire qui couvre la planète ». Il aurait dû permettre d'appeler de n'importe quel point du globe sans plus aucune contrainte grâce à une constellation de 66 satellites en orbites basses (LEO) à 780 kilomètres au-dessus de la terre.



Figure 4.8. Le système Iridium

Ce programme, de 7 milliards de dollars engagés par 20 investisseurs dont Motorola, débouche sur un échec commercial majeur. Six mois après son lancement (mise en service 1998), Iridium ne compte que 10.294 abonnés contre les 50.000 escomptés, au minimum. Le réseau est placé sous contrôle judiciaire août 1999 et cesse de fonctionner en mars 2000 quand les derniers investisseurs se retirent et qu'aucun repreneur ne se manifeste. Pis encore, près de 7 milliards de dollars partent en fumée, les responsables du groupe Iridium ayant décidé de " désorbiter" ces 66 satellites. Le maintien du système aurait coûté 10 millions de dollars. Après coup, les analystes évoquent plusieurs raisons pour expliquer ce fiasco :

- Tout d'abord une sous-estimation de la montée en puissance des réseaux de téléphonie mobile qui disposent d'une couverture de plus en plus étendue,
- Les questions de coût : le portable spécial est vendu 24.000 francs en France, l'abonnement est de 350 à 500 F mensuel et la communication de 11,50 à 63 F la minute. Le ciblage d'une clientèle beaucoup trop restreinte compte tenu des coûts proposés,
- La réception est impossible dans un bâtiment et difficile sous un arbre,
- Iridium s'est positionné en concurrent des opérateurs nationaux en court-circuitant les réseaux locaux,
- Enfin Iridium a été financé par des obligations à haut rendement et à hauts risques et s'était donc engagé vis-à-vis des places financières à tenir des objectifs intenable.

Pourtant le programme Iridium était né sous les meilleurs auspices. Des organisations d'une grande maturité économique et technique président à son développement (Motorola, Lockheed, Raytheon, et d'autres grandes compagnies). Comme l'indiquent J.H. Brill, J. Chevallier et J.L. Merchadou dans leur *Manuel des meilleures pratiques pour le développement des projets spatiaux*, ([BRI 00], page 9), le programme Iridium a tiré profit des meilleures pratiques pour le développement des projets spatiaux et notamment du « Systems Engineering Process ». On peut donc supposer, qu'à toutes les phases du cycle de développement du programme, ont été conduits des processus :

- d'analyse et de validation des exigences,
- d'estimations des coûts du cycle de vie (LCC) du système,
- de gestion des risques du programme.

Que faut-il en conclure ?

- que les normes et les standards d'ingénierie n'ont pas été respectés ?,
- que les processus d'ingénierie, tels qu'ils sont définis, ne répondent pas au besoin méthodologique ?
- qu'Iridium a joué de malchance ?

4.2.2. Pourquoi les projets d'ingénierie échouent-ils si souvent ?

Dans un très célèbre rapport, intitulé « les chroniques du Chaos », publié en 1994 (10 ans déjà) le Standish Group¹⁴ faisait à propos des projets informatiques un bilan parfaitement consternant : sur environ 175 000 projets menés aux USA, 31,1% étaient arrêtés avant d'aboutir, le coût final de 52,7% d'entre eux doublait pratiquement l'estimation de coût initiale alors que seulement 16,2% d'entre eux s'achevaient dans les délais et dans les coûts prévus.

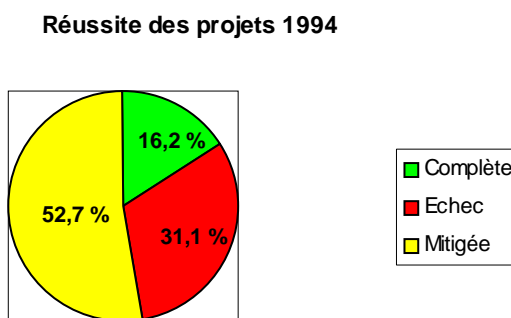


Figure 4.9. Taux de réussite des projets en 1994

En 1998, le rapport équivalent notait une amélioration de la situation : sur 23 000 projets, 26% étaient arrêtés avant d'aboutir, 46% restaient hors délais et hors budget pour 28% qui s'achevaient dans les délais et dans les coûts prévus tout en mettant en évidence que d'importants progrès restaient à faire.

¹⁴

<http://standishgroup.com/>

Réussite des projets 1998

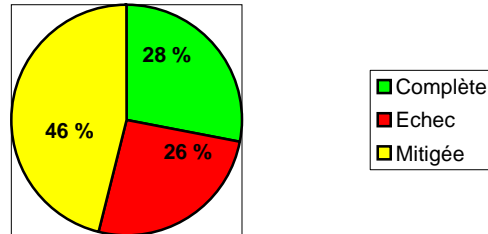


Figure 4.10. Taux de réussite des projets en 1998

L'édition 2004 du rapport marque une situation plus contrastée qui confirme que d'importantes marges progrès existent encore : une diminution des projets échouant absolument (16% des projets arrêtés avant d'aboutir), une augmentation du nombre des projets affichant des résultats mitigés (53% hors délais et hors budget) une constance des projets qui s'achevent dans les délais et dans les coûts prévus (29%)

Réussite des projets 2004

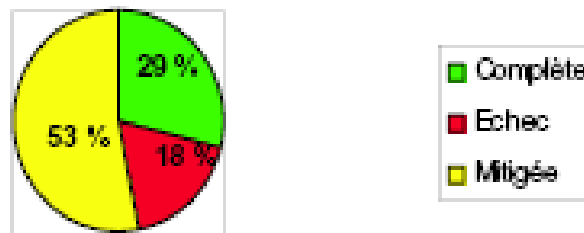


Figure 4.11. Taux de réussite des projets en 2004

Parmi les causes principales invoquées par le Standish Group pour expliquer l'arrêt de projets avant leur achèvement normal, on trouve :

| Facteurs d'échec | Pourcentage |
|---|-------------|
| Des exigences incomplètes | 13,1 % |
| Un défaut d'implication des utilisateurs | 12,4 % |
| Un défaut de ressources allouées au projet | 10,6 % |
| Des attentes irréalistes | 9,9 % |
| Un défaut d'engagement de la direction | 9,3 % |
| Une instabilité des exigences et des spécifications | 8,7 % |
| Un défaut de planification | 8,1 % |
| La disparition du besoin | 7,5 % |
| Un déficit de gestion technique | 6,2 % |
| Une incompétence technique | 4,3 % |

Parmi les causes principales invoquées par le Standish Group pour expliquer un résultat controversé de projets (dépassements de budget et de délais), on trouve :

| Causes des retards et des dépassements de budgets | |
|---|--------|
| Défaut d'entrées utilisateurs | 12,8% |
| Exigences et spécifications incomplètes | 12.3% |
| Instabilité des exigences et spécifications | 11,8 % |
| Défaut d'engagement de la direction | 7,5 % |
| Une incompétence technique | 7,0 % |
| Un défaut de ressources | 6,4 % |
| Des attentes irréalistes | 5,9 % |
| Des objectifs obscurs | 5,3 % |
| Une planification irréaliste | 4,3 % |
| Une nouvelle technologie | 3,7 % |

Nous ne disposons pas d'informations quantitatives aussi précises concernant les projets de développement de systèmes mais l'analyse qualitative d'échecs retentissants comme celui du développement de la constellation de satellites IRIDIUM (présenté ci-dessus), celui de l'hélicoptère Commanche aux USA (programme hélicoptère de combat remplaçant de l'Apache abandonné en 2000 après une dérive de coûts exceptionnelle), du projet Aramis (système de transport ferré,[LAT) ou du système JetPhone (système de communications téléphoniques de cabine avion- réseau public) en France et bien d'autres encore. Les exemples ne manquent pas, par exemple, dans les rapports de la Cour des Comptes (www.ccomptes.fr/).

Nous faisons nôtres les analyses du Standish Group. Les causes d'échec qu'ils évoquent restent à nos yeux valables, seul le poids respectif de chaque facteur pourrait faire l'objet d'une révision.

Le « chaos » des projets d'ingénierie a, semble-t-il, ici aussi, pour cause principale, à coté du changement du contexte dans lesquels ils sont immergés, un déficit de coopération et d'entente entre les parties prenantes. Le processus d'ingénierie des systèmes devrait s'organiser autour de dispositifs permettant d'assurer la réalisation d'accords entre les parties prenantes.

Conclusion de la première partie : la taylorisation des activités de conception ?

La présentation des visions ontologique et méthodologique des systèmes et de leur ingénierie qui, selon nous, se dégagent des standards et du corpus des connaissances partagées par la communauté des ingénieurs système, nous a permis de mettre en évidence des fragilités théoriques et pratiques. La thèse que nous soutenons à propos des éléments présentés dans la première partie, est la suivante :

- L'état de l'art, qui se matérialise dans les standards et le corpus des connaissances d'ingénierie, révèle l'expansion d'une forme particulière de la rationalité, la rationalité instrumentale, et ce dans une sphère particulière de la production, celle de la conception et du développement des systèmes techniques, c'est-à-dire, celle des activités préliminaires à la production matérielle des systèmes techniques.
- au plan théorique, nous avons pu notamment constater la faiblesse du concept pourtant central et nécessaire¹⁵ en ingénierie système, celui de fonction, (des critiques du même ordre auraient pu être adressées à d'autres concepts comme celui d'exigence ou encore de système, par exemples),
- au plan pratique, nous avons pu notamment souligner les limites de l'efficacité¹⁶ de la raison instrumentale, au travers de ses échecs en ingénierie, dues pour partie, selon nous à son incapacité de prendre en considération la coopération et l'entente entre les parties prenantes.

¹⁵ Contrairement à ce que proclament les adeptes des « approches objets »

¹⁶ Le prodigieux développement des « forces productives » aux XIX et XX siècle est indissociable du triomphe de la raison instrumentale sous sa forme technique, le taylorisme.



Figure 0.2. Une vision unidimensionnelle dominée par la raison instrumentale.

Les standards et les méthodes d'ingénierie apparaissent essentiellement comme des ensembles de mécanismes rationnels et coordonnés rationnellement en ce sens qu'ils sont la mise en adéquation des moyens par rapport aux fins poursuivies, en vue d'une fin définie à savoir « *transformer des besoins utilisateur, des exigences et des contraintes en un système solution* » (IEEE 1220, abstract). Pour parvenir à cette fin, les méthodologues, inspirés par une logique à connotation instrumentale, sont conduits à définir très précisément « *un ensemble de tâches multidisciplinaires* » qui doivent être exécutées par des acteurs humains (designers, managers, systems engineers, ..).

Implicitement, il est ainsi suggéré que la stricte observance de l'esprit des prescriptions contenues dans ces standards, sinon de leur lettre, doit permettre d'atteindre le but fixé, à savoir la réalisation d'un système visé. Inversement, si le but fixé n'est pas atteint alors la cause doit en être recherchée dans des écarts, des déviations dans la conduite des processus et le non respect des prescriptions formulées (C'est ici la logique des modèles de maturité et du CMMI).

Nous relierons ces constats et cette interprétation à ce qu'un des fondateurs de la sociologie, Max Weber, a pu soutenir à propos de notre modernité. Notre modernité, selon Weber, est caractérisée par un processus d'expansion de la rationalité dans toutes les sphères de la vie sociale, l'économie, le droit, l'administration, dans l'image du monde que donne la science ou encore dans l'art [MAR 99].

De plus, ce que met en évidence Weber est le déploiement, non pas de **la** rationalité en général, mais d'une forme particulière de rationalité dans les divers domaines de la vie sociale :

- qui mène à une régularité et à une prévisibilité croissantes des conduites humaines,
- et se définit par l'augmentation croissante du rôle de la rationalité formelle, des actions centrées sur l'adéquation moyens - fins (actions rationnelles par rapport aux fins) au détriment d'actions guidées par des postulats de valeur (actions rationnelles par rapport aux valeurs).

Cette représentation rationnelle du monde (par rapport aux fins) s'applique à toutes les sphères de la vie sociale à des rythmes et selon des temporalités d'évolution particulières pour chacune des différentes sphères. Ainsi dans la sphère sociale du travail, la « rationalisation » de la fabrication des produits manufacturés n'a pas eu lieu en même temps et n'a pas été au même rythme que celle de l'agriculture, de l'élevage et la pêche (l'agro-industrie). Dans un même domaine, par exemple, celui des produits manufacturés, la « rationalisation » des différents processus, de la conception au recyclage en passant par la fabrication, les essais et la maintenance ne suivent pas eux non plus les mêmes rythmes. Le processus de fabrication a fait l'objet de l'attention de tous les théoriciens des bureaux de méthodes (avec comme précurseur et figure de proue Frederik Winslow Taylor) et ce bien avant que cette rationalisation n'englobe celui de la conception de ces produits. Nous désignons par **raison instrumentale**, selon une formule due à Horkheimer [HOR 96], cette forme particulière de la rationalité qui est celle de la mise en rapport adéquat de moyens par rapports à des fins, la question des fins étant rejetée hors du champ de la rationalité.

Deuxième Partie : Théorie des systèmes techniques et Processus d'entente

*« Nous appliquons le prédicat « rationnel »
aux opinions, aux actions et aux actes de discours, parce que
dans la structure propositionnelle de la connaissance,
dans la structure téléologique de l'action,
dans la structure communication du discours,
nous rencontrons **différentes racines de la rationalité.** »*

Jürgen Habermas, Vérité et Justification.

Introduction : ingénierie et formes de la rationalité

Notre projet est d'inscrire les processus d'ingénierie des systèmes dans une démarche rationnelle qui ne se réduise pas à sa seule dimension instrumentale dont nous avons, après bien d'autres, souligné les limites. Pour élargir notre champ de vision, nous nous proposons tout d'abord d'explorer les différentes formes de la rationalité.

Les différentes formes de la rationalité

On présente la rationalité comme l'une des matrices de la modernité, c'est-à-dire comme l'un des traits qui a formé et qui distingue les sociétés modernes par rapport aux sociétés antérieures ([MAR 99], seconde partie). Cette rationalité est souvent appréhendée comme raison omnipotente, instrumentale et moteur du progrès.

- Contre quoi il faut dire en premier lieu que la raison est « limitée ». Nous partageons le point de vue de H.A. Simon et de James March repris par Michel Crozier et Erhard Friedberg [CRO 77] lorsqu'ils soutiennent :
 - qu'un décideur (et un concepteur est un décideur) ne dispose jamais de toutes les informations dont il a besoin pour décider. Quand bien même il disposerait de ces informations, il ne disposerait ni des capacités nécessaires ni du temps nécessaire pour les traiter,
 - qu'un décideur dispose d'un système de préférences qui, au contraire d'être stable et donné une fois pour toutes, fluctue au cours du temps du fait des évolutions du contexte dans lequel il se situe (lui et son problème) mais aussi du fait de l'apprentissage¹⁷ continu qu'il fait du problème qu'il a à traiter,
 - qu'un décideur, au lieu de mettre en œuvre un raisonnement synoptique permettant un examen exhaustif et simultané de toutes les solutions possibles et de leurs conséquences

¹⁷ Ainsi D. Schön a pu présenter dans l'activité de conception comme un dialogue du concepteur avec l'objet à concevoir

probable afin d'optimiser ses choix, raisonne le plus souvent de façon séquentielle et s'arrête le plus souvent à la première solution acceptable.

- A ces raisons mises en avant par H.A. Simon et James March, il faudrait en ajouter une autre supplémentaire, le décideur (et le concepteur) isolé et solitaire qui prendrait ses décisions en toute conscience est une abstraction vide, pour nous les décideurs sont nécessairement immergés dans un tissu de relations sociales et les décisions qu'ils sont amenés à prendre sont nécessairement marquées par les interactions sociales.
- En second lieu, il faut cesser de réduire la rationalité à sa dimension instrumentale. Nous reprenons à notre compte la proposition de Habermas [HAB 01] selon laquelle est rationnelle une personne qui pense, agit et parle rationnellement. A partir de ces trois dimensions (penser, agir, parler) nous pouvons dégager les trois racines de la rationalité :
- la **rationalité cognitive** (ou **épistémique**, selon l'expression de Habermas) comme matrice de la **pensée** rationnelle,
- la **rationalité instrumentale** (ou **téléologique**, selon le même) comme matrice de l'**action** rationnelle, et enfin,
- la **rationalité de l'entente ou communicationnelle** comme matrice du **discours** rationnel.

Bien que fortement intriquées les unes aux autres, aucune de ces trois formes de la rationalité n'est réductible aux autres. En effet :

Premièrement, la **rationalité cognitive** vise à la **vérité**, elle s'exerce dans le champ de la **connaissance**. La rationalité scientifique en est la forme la plus achevée. Les corpus de connaissances, lorsqu'ils s'appliquent au monde réel, peuvent être empiriques, c'est-à-dire qu'on peut ne pas disposer pour elles de mécanismes explicatifs ou alors accéder au statut scientifique dès lors qu'un tel mécanisme explicatif est capable de rendre compte des faits observés. Les faits, propositions et jugements contenus dans ces corpus sont tenus pour certains par ceux qui les manipulent. Toutefois, ces théories, pour certaines qu'elles soient dans l'instant, restent **faillibles** et suspendues à une **réfutation** qui viendrait soit les invalider complètement soit les relativiser.

Deuxièmement, la **rationalité instrumentale** vise à l'**efficacité**, elle s'exerce dans le champ de l'**action**. Elle correspond à ce que Max Weber avait désigné sous le terme de rationalité des moyens par rapport à une fin, ou Max Horkheimer, sous le terme de rationalité instrumentale. Une action est efficace si elle atteint son but. Une action peut manquer son but parce que le contexte de l'action s'est modifié de façon contingente et à l'insu de l'acteur. Ces circonstances n'entameront pas pour autant le caractère rationnel de l'action si elles ne pouvaient être surveillées, anticipées et/ou évaluées. Ce qui caractérise l'action rationnelle, c'est la capacité de l'acteur à mobiliser et à mettre en œuvre des connaissances au service du but visé et la capacité à rendre compte, si besoin, des moyens utilisés. On peut également souligner ici le caractère plus ou moins assuré de l'action qui, même lorsqu'elle est rationnelle, n'a qu'une probabilité de réussite.

Enfin, troisièmement, la **rationalité de l'entente** vise à l'**accord** entre les personnes, elle s'exerce dans le champ de la **discussion**. Comme le rappelle Habermas, qui s'appuie sur les travaux du linguiste W. Von Humboldt, les langues humaines ont une triple fonction :

- **Cognitive**, au sens où elles sont formatrices de l'appréhension du monde des communautés linguistiques au travers de leurs filtres,
- **Expressive**, dans la mesure où elles permettent de faire état de nos sentiments et de susciter chez les autres des émotions,
- **Communicationnelle**, dans la mesure où elles permettent aux membres d'une même communauté, (1) aux uns de présenter des énoncés, (2) aux autres de proposer des objections et enfin (3) aux uns et aux autres de réaliser des accords.

Une discussion sera dite rationnelle, si elle permet à ses protagonistes (tour à tour locuteurs et auditeurs) de se mettre d'accord sur quelque chose (un fait, une action, un jugement, une décision, ..). Cette discussion assure alors aux parties prenantes l'existence d'un **monde vécu intersubjectif** qu'ils partagent et l'existence d'un seul et même **monde objectif** auquel les uns et les autres peuvent se référer.

L'articulation nécessaire des trois formes de la rationalité

Pour nous, une conduite rationnelle en conception et en ingénierie de systèmes ne peut se réduire à des actions qui mettent en rapport les moyens « les plus appropriés » à des fins mais doit être comprise comme une conduite qui est également (1) fondée sur une base cognitive consistante et (2) qui vise par ailleurs à construire un accord entre les parties prenantes.

Il s'agit pour nous, partant de la logique instrumentale, telle qu'elle apparaît dans les standards, de la prolonger suivant deux directions :

- La première concerne la rationalité cognitive et les bases théoriques de l'ingénierie des systèmes. Il n'est pas possible selon nous de mettre en œuvre une ingénierie des systèmes techniques efficace sans s'appuyer sur une base théorique consistante, une théorie des systèmes techniques et de leur ingénierie, comme semble le négliger un standard comme l'ISO-15288. Nous voyons dans les difficultés actuelles que les entreprises rencontrent dans le déploiement de l'ingénierie des exigences une traduction de ces insuffisances théoriques.
- La seconde concerne la rationalité de l'entente et les conditions de réalisation d'accord entre parties prenantes à propos d'un système technique et de son ingénierie. Notre but est alors, sous l'hypothèse de la rationalité limitée de n'importe quel acteur, pris isolément, de repousser les limites de la rationalité instrumentale, en invoquant « les figures du collectif¹⁸ », c'est-à-dire, ayant recours aux potentialités offertes par le groupe (les parties prenantes d'un projet d'ingénierie).

¹⁸ Cette expression fait référence à un ouvrage dirigé par Bénédicte Reynaud, Jean Pierre Dupuy, Pierre Livet : « Les limites de la rationalité tome 2 : Les figures du collectif »

Chapitre 5

Propositions pour une ontologie des systèmes techniques

Dans ce chapitre, nous nous proposons de répondre aux questions suivantes : qu'est-ce qu'un système ? Quelles sortes de systèmes existe-t-il ? Comment se placent les systèmes techniques par rapport aux autres systèmes ? En d'autres termes, nous soutenons dans ce chapitre une **ontologie des systèmes**, qu'ils soient concrets ou conceptuels. Ces deux catégories de systèmes sont largement utilisées en ingénierie des systèmes techniques. En effet en ingénierie, nous sommes amenés à créer des systèmes conceptuels qui sont des représentations des systèmes concrets que l'on veut produire et exploiter.

5.1. Ontologie des systèmes

La définition des systèmes techniques que nous proposons est largement (et librement) inspirée par les travaux de l'épistémologue Mario Bunge. Mario Augusto Bunge est aujourd'hui professeur de philosophie des sciences et des techniques à l'Université Mc Gill de Montréal. Au départ (années 60), chercheur dans le domaine de la physique quantique, il élabore à partir des problèmes ontologiques, épistémologiques et méthodologiques soulevés par cette discipline un appareil hypothético-déductif considérable qu'il appelle tour à tour « réalisme scientifique » ou « philosophie exacte ». Il collabore notamment dans les années 70 et 80, à la revue « General Systems » qui fait mondialement autorité dans le domaine de la théorie du système général. Il peut, selon nous, être considéré comme un continuateur de l'œuvre engagée par L. von Bertalanffy sur les mêmes bases réalistes et rationalistes que celui-ci avait adoptées. Concernant la théorie des systèmes, ses œuvres maîtresses sont (1) « Le mobilier du Monde » [BUN 77], (2) « Un monde de systèmes » [BUN 79] et (3) « Méthode, Modèle et Matière » [BUN 72]. Mario Bunge est quasiment inconnu en France¹⁹ et il n'est référencé dans pratiquement aucune bibliographie. Dans un échange dont il nous a fait l'honneur, il nous confirme cette situation qu'il attribue à une pensée anti-scientifique et anti-rationaliste dominante. Pour nous, l'hégémonie intellectuelle exercée depuis trois décennies sur la communauté académique et le public cultivé par des figures de proue telles que Edgar Morin ou Jean Louis Le Moigne n'est pas étrangère à cette situation. Mario Bunge s'oppose radicalement et de façon rigoureuse et cohérente au constructivisme²⁰ dont Morin et Le Moigne sont les représentants français les plus illustres.

5.1.1. Systèmes

Par opposition à une collection d'objets dépourvus de relations entre eux, un système Σ est une collection d'objets entretenant des relations les uns avec les autres. Contrairement à un simple agrégat (ou réunion d'objets), l'existence de telles relations **est la condition constitutive** d'un système.

¹⁹ Une remarque dans un ouvrage de Daniel Durant, La systémique nous l'a fait découvrir.

²⁰ Nous avons réalisé une présentation du constructivisme de J.L Le Moigne dans l'annexe A

Ainsi, une constellation stellaire, celle de la Grande Ourse, par exemple, une foule de flâneurs vaquant à leurs occupations un samedi sur un boulevard, un ensemble d'objets trouvés ne constituent pas des systèmes en raison de l'absence de relations entre les « parties » du « tout ».

Contrairement à un simple agrégat ou à un ensemble, un système Σ est, à un moment donné t , caractérisé par trois notions :

- La **composition** $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ du système Σ , c'est-à-dire l'ensemble des objets qui le composent à un instant t ,
- L'**environnement** $\mathcal{E}(\Sigma, t)$ du système Σ qui est un ensemble d'objets n'appartenant pas à $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ à l'instant t ,
- La **structure** $\mathcal{S}(\Sigma, t)$ du système Σ qui est l'ensemble de relations $\mathcal{S}(\Sigma, t) = \prod_{i=1}^{n>1} \mathcal{C}(\Sigma, t) \times \prod_{i=1}^{n>1} \mathcal{E}(\Sigma, t)$ que $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ entretient avec lui-même et avec l'environnement $\mathcal{E}(\Sigma, t)$ à l'instant t .
- $\mathcal{S}_{\mathcal{I}}(\Sigma, t) = \prod_{i=1}^{n>1} \mathcal{C}(\Sigma, t)$ l'ensemble de relations que $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ entretient avec lui-même, à l'instant t , constitue la **structure interne** ou **l'architecture interne** de Σ à l'instant t .

L'ensemble des relations que la composition $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ entretient avec lui-même est nécessairement non vide, sinon Σ ne serait pas un système, à cet instant t . De plus, si l'ensemble des relations que $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ entretient avec $\mathcal{E}(\Sigma, t)$ est vide alors le système Σ est **clos** à l'instant t (**ouvert**, dans le cas contraire)

Nous avons utilisé avec insistance une caractérisation des systèmes $\Sigma = (\mathcal{C}(\Sigma, t), \mathcal{E}(\Sigma, t), \mathcal{S}(\Sigma, t))$ faisant ressortir sa dépendance vis-à-vis du paramètre temps t , notamment pour signifier qu'entre le moment de sa génération et celui de sa disparition, la composition, l'environnement et la structure d'un système peuvent varier. Ainsi, un système biologique (système vivant) voit sa composition entièrement renouvelée de sa génération à sa disparition. De la même manière, pendant le cycle de vie d'un système, la composition du système peut incorporer des éléments de son environnement ou au contraire transférer une part de ses éléments vers son environnement.

Moyennant cette définition, nous postulons l'existence de deux catégories de systèmes :

- Les **systèmes matériels** ou **concrets** Σ dont la composition $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ et l'environnement $\mathcal{E}(\Sigma, t)$ sont formés d'**objets concrets** et dont la structure $\mathcal{S}(\Sigma, t)$ est formée de **relations matérielles : liaisons** ou structure **statique** et **interactions** ou structure **dynamique**. Les systèmes concrets peuvent être **naturels** ou **artificiels** (c'est-à-dire, pour les systèmes artificiels, synthétisés par des êtres rationnels). En ingénierie des systèmes au sens où les définit l'ISO 15288, nous rencontrons, cette première catégorie de systèmes. Un véhicule automobile, un groupe motopropulseur, un moteur thermique, un système de suspension constituent des exemples de systèmes matériels,
- Les **systèmes conceptuels** Σ dont la composition $\mathcal{C}(\Sigma, t)$ et l'environnement $\mathcal{E}(\Sigma, t)$ sont formés d'**objets abstraits** (termes, concepts, propositions, théories, produits par des êtres raisonnables) et dont la structure $\mathcal{S}(\Sigma, t)$ est formée de **relations formelles**. En ingénierie des systèmes, nous rencontrons également cette seconde catégorie de systèmes. Une analyse fonctionnelle d'un véhicule, un modèle de conception d'un véhicule ou encore une simulation dynamique de ce véhicule sont des exemples de systèmes conceptuels (modèles) lesquels peuvent avoir un rapport plus ou moins étroit avec le système matériel qu'ils représentent.

Les seconds n'existent pas indépendamment de ceux qui les conçoivent, ils sont des créations particulières des humains qui les pensent.

5.1.2. Systèmes concrets

Les systèmes matériels Σ sont composés d'au moins deux objets concrets en interaction matérielle. Ces interactions matérielles peuvent être de natures très diverses, mécanique, magnétique, électrique, thermique, chimique, biologique, sociale, ... Les **interactions** (structure dynamique) entre constituants du système et de l'environnement sont guidées par les **liaisons** (structure statique) que les constituants du système et de l'environnement entretiennent les uns avec les autres. Ces liaisons, qui sont des éléments matériels (matière ou champ), appartiennent soit à la composition soit à l'environnement du système.

Ainsi, le moteur et le châssis d'un véhicule sont-ils liés par des éléments de liaison mécaniques présentant une certaine élasticité. Elles rendent solidaires moteur et châssis tout en atténuant leurs interactions (chocs et vibrations). Ces liaisons appartiennent conventionnellement soit au moteur soit à l'environnement. De même, un satellite et les stations sol avec lesquelles le satellite communique sont liés par des liaisons électromagnétiques TM (voie descendante) et TC (voie montante). Ces deux voies sont des constituants du système satellitaire (liaisons internes) qui servent de support aux interactions entre les segments sol et bord.

Cette définition nous renvoie à la question de ce que sont d'une part un objet concret et d'autre part une interaction entre objets concrets.

5.1.2.1. Objets concrets : Matière et Forme

Nous faisons nôtre le postulat aristotélicien selon lequel être c'est être de la matière informée : « **La matière, c'est par exemple l'airain; la forme, c'est par exemple la figure que revêt la conception de l'artiste et l'ensemble qu'elles produisent en se réunissant, c'est la statue** » *Aristote; Métaphysique Livre Z chap. III.*

Ainsi le vilebrequin, partie de l'équipage mobile présenté ci-dessous, est bien un objet concret c'est-à-dire de la matière mise en forme par des agents, les concepteurs et fabricants du vilebrequin à partir de matières premières (fer et autres métaux), elles-mêmes savamment alliées.

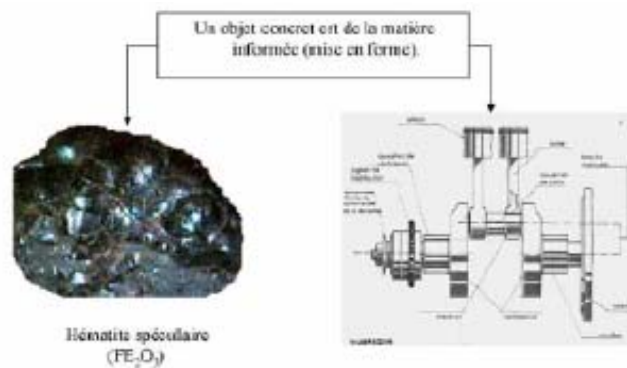


Figure 5.1. Matière et Forme.

Le terme usuel de matière première, objet concret naturel, ne doit pas laisser penser qu'il pourrait s'agir d'une matière sans forme. La matière (y compris première) est toujours déjà informée. Ce qui nous intéresse dans cette caractérisation de l'objet concret, c'est :

- d'une part, qu'elle permet de penser que la matière est en puissance de déterminations non encore actualisées qui comporte un univers de changements et de transformations possibles,
- d'autre part, qu'elle présuppose une conception réaliste du monde et fait écho à ce que les physiciens Jean Marc Levy-Leblond et Françoise Balibar ([LEV 97], page 50) évoquent à propos de la matière : « *la matière en termes classiques doit être conçue comme constituée à la fois de particules et de champs. Un objet complexe contient un certain nombre de particules et le champ*

qu'elles engendrent et qui les lie ». En nous situant dans une perspective quantique, il faudrait alors faire référence aux *quants*

5.1.2.2. Une théorie des propriétés matérielles

De là, nous proposons une théorie des propriétés matérielles d'un objet concret dont nous tirerons profit dans le cadre de notre exposé sur l'ingénierie des exigences (section 6.1.2, La synthèse des exigences).

La *forme* est ce qui vient caractériser l'objet concret, c'est-à-dire que la forme d'un objet est l'ensemble des propriétés actuelles et mais aussi potentielles qui viennent déterminer la *matière*. La forme est le principe d'unité et d'organisation des objets concrets. On peut évoquer à propos d'un objet concret ses propriétés mécaniques, thermiques, électriques, magnétiques, chimiques, sa longueur d'onde ou sa fréquence pour un champ. Nous pouvons citer sa masse, son état (solide, liquide, gazeux, plasma), son volume, sa densité, sa température, sa capacité calorifique spécifique, sa conductivité thermique, sa dureté, son élasticité, son élasticité, conductivité et sa résistivité électriques, la perméabilité magnétique. Nous assumons également l'idée selon laquelle les propriétés spatio-temporelles d'un objet concret, sa localisation, son cycle de vie sont également des propriétés matérielles de cet objet.

Alors que nous sommes capables de ne penser qu'à un nombre fini de propriétés d'un objet concret, il est possible que l'ensemble de ces propriétés soit indénombrable. Ce qui introduit une différence de statut entre ce qui est (ontologie) et ce que nous en savons (épistémologie).

Nous notons C l'ensemble des objets concrets (nous verrons dans la section 5.3, que les artefacts et les systèmes techniques constituent des sous-ensembles de C). Nous désignons par P , l'ensemble des propriétés des objets concrets. Une propriété P appartient à P , s'il existe au moins un objet concret C de C tel que C possède P . Nous notons $p(C)$ l'ensemble des propriétés portées par l'objet concret C (on a $p(C) \subset P$) et nous notons $C(P)$, l'ensemble des objets concrets possédant la propriété P .

Nous admettons qu'une propriété matérielle P est représentable par une fonction définie sur l'ensemble des objets concrets qui possèdent cette propriété dans un domaine D que nous préciserons ultérieurement.

$$P: C(P) \rightarrow D \quad [5.1]$$

Il se peut que deux propriétés P et P' soient **incompatibles**, il n'existe alors aucun objet concret possédant à la fois P et P' , autrement dit, l'ensemble $C(P) \cap C(P') = \emptyset$.

Il se peut qu'un objet concret C possède à la fois la propriété P et la propriété P' et que cette coïncidence soit fortuite. Ici $C \in C(P)$ et $C \in C(P')$ ou encore $C(P) \cap C(P') \neq \emptyset$. Cela indique seulement que P et P' ne sont pas incompatibles mais peuvent être possédées par C de manière **accidentelle**, il s'agit d'une **concomitance accidentelle**. En revanche, deux propriétés P et P' peuvent être **essentiellement concomitantes** et alors que $C(P) = C(P')$. Dans ce cas, tous les objets concrets possédant la propriété P possèdent également la propriété P' . Dans ce cas, une loi matérielle lie P et P' même si nous en ignorons l'expression, voir l'existence même. Les lois de la physique, par exemple, sont des expressions symboliques de ce type de lois concrètes. Ainsi la loi des gaz parfaits qui lie pression, volume et température d'un gaz et dont on sait qu'elle est approximativement vraie (comme tous les énoncés de lois factuelles).

On peut définir un opérateur de composition \wedge entre propriétés de la manière suivante : pour tout C de C , C possède la propriété $P \wedge P'$ si C possède la propriété P et la propriété P' . On ne peut pas toujours composer des propriétés entre elles. La composée de deux propriétés incompatibles n'existe pas, c'est-à-dire qu'aucun objet ne la possède de façon concomitante.

On peut également distinguer une propriété particulière (une fiction) la propriété Nulle, celle qui n'apporte aucune détermination supplémentaire à un objet C qui la possède ou qui ne détermine rien de plus à propos de cet objet. Cette propriété Nulle est un élément neutre pour la composition, on a $P \wedge \text{Nulle} = \text{Nulle} \wedge P = P$. Tout objet concret C possède cette propriété Nulle, il s'agit d'une propriété universelle.

On peut alors définir une structure d'ordre entre propriétés de la manière suivante la propriété P précède la propriété P' ($P \leq P'$) si et seulement si le fait, pour un objet concret C, de posséder P' entraîne le fait de posséder P. En d'autres termes, $P \leq P' \Leftrightarrow [P' \in p(C) \Rightarrow P \in p(C)]$. Ainsi la propriété Nulle précède toutes les propriétés de C, en d'autre terme la propriété Nulle est l'élément minimum de $p(C)$. De même, si P et P' sont des propriétés de C alors elles précèdent leur composée $P \wedge P'$.

Nous pouvons par ailleurs distinguer deux catégories de propriétés des objets concrets :

- Les propriétés **intrinsèques** et
- Les propriétés **relationnelles**.

5.1.2.3. Propriétés intrinsèques et états d'un objet concret

La première catégorie de propriétés d'un objet concret \mathcal{O} regroupe les **propriétés intrinsèques** de l'objet, c'est-à-dire les propriétés qui appartiennent à l'objet et à lui seul.

Les propriétés intrinsèques des objets concrets sont représentables par des fonctions dont le codomaine est l'espace \mathbb{R}^n (vecteurs réels) :

$$P: C(P) \rightarrow \mathbb{R}^n \quad [5.2]$$

L'exemple qui vient immédiatement est celui de la masse $m(\mathcal{O})$ d'un objet concret \mathcal{O} . Outre la masse, les inerties, dimensions géométriques, la densité, la capacité thermique spécifique, la résistance électrique, la capacité électrique et impédance constituent autant d'exemples de propriétés intrinsèques d'objets concrets. Ainsi pour un objet concret tel qu'un vilebrequin, nous pouvons nous intéresser à des propriétés intrinsèques telles que



- propriétés géométriques** des tourillons
Longueur, diamètre, états de surface, alignement (ligne d'arbre)
- propriétés géométriques** des manetons
Longueur, diamètre, état de surface, parallélisme avec la ligne d'arbre;
Distance entre l'axe des tourillons et des axes des manetons
- propriétés du matériau:**
Acier forgé au Ni-Cr ou fonte moulée au Cr ou Si traitements thermiques, module d'élasticité, limite de déformation plastique, de rupture.
- propriétés d'inertie:**
Masse du vilebrequin, masses d'équilibrage

Les traités de sciences expérimentales constituent des catalogues de propriétés intrinsèques d'objets concrets (bien qu'ils ne s'y réduisent pas). Les propriétés intrinsèques des objets concrets peuvent être constantes (comme dans le cas de la masse d'un solide) ou variables comme, par exemple, la masse d'un aéronef pendant un vol, la teneur en carbone 14 pour les objets fossiles.

5.1.2.4. *Propriétés relationnelles et interactions entre objets concrets*

La seconde catégorie de propriétés d'un objet concret \mathcal{O} regroupe les **propriétés relationnelles** de l'objet, c'est-à-dire, celles qui ne peuvent être imputées au seul objet concret qui les porte.

Les propriétés relationnelles des objets concrets sont représentables par des fonctions dont le codomaine est un espace de fonctions de \mathbf{C}^n (n -uplets d'objets concrets) dans \mathbf{R}^m (vecteurs réels) :

$$P: \mathbf{C}(P) \rightarrow \mathbf{F}(\mathbf{C}^n, \mathbf{R}^m) \quad [5.3]$$

Dans la continuité de l'exemple précédent, relatif à la masse d'un objet concret, celui qui vient immédiatement est celui de son poids $p(\mathcal{O})$. En effet, le poids d'un objet concret \mathcal{O} n'est pas uniquement imputable à l'objet lui-même (par le biais de sa masse m) mais également à l'intensité g du champ gravitationnel là où se situe l'objet \mathcal{O} . Cette intensité g mesure l'intensité de l'**action à distance** d'un objet concret \mathcal{T} différent du précédent \mathcal{O} sur n'importe quel objet concret qui se trouve dans son environnement.

Ainsi le poids $p(\mathcal{O})$, propriété relationnelle de l'objet concret représente l'**effet** d'une action à distance de l'objet concret \mathcal{T} sur l'objet concret \mathcal{O} .

Les propriétés relationnelles d'un objet concret traduisent soit les **actions** de l'objet \mathcal{O} sur d'autres objets concrets situés dans son environnement, soit les **réactions** de l'objet \mathcal{O} à des actions exercées sur lui par d'autres objets concrets situés dans son environnement.

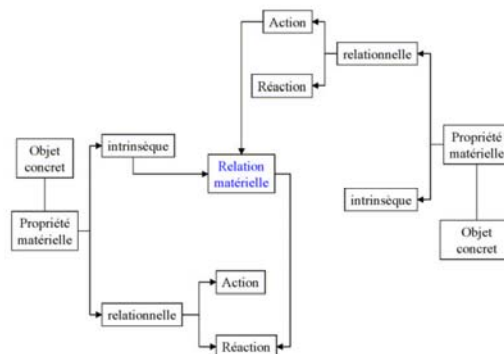


Figure 5.2. *Propriétés relationnelles des objets concrets.*

Ces propriétés relationnelles d'un objet concret ne sont pas directement observables mais ne s'expriment que par le truchement soit des **effets** exercés sur l'objet \mathcal{O} par les actions des objets concrets de son environnement qui agissent sur \mathcal{O} , soit des **effets** exercés sur les objets concrets de son environnement par les actions de l'objet \mathcal{O} . Les recueils de sciences expérimentales constituent également des catalogues des propriétés relationnelles de objets concrets.

5.1.2.5. *Etats et changement des objets concrets, lois, événements et processus*

Le concept de propriétés d'un objet concret permet d'introduire la notion d'**état d'un objet concret**. Ainsi, la variation de teneur en carbone 14 traduit un changement de l'état de l'objet fossile. C'est ce changement d'état qui permet sa datation.

On peut alors définir un état d'un objet concret \mathcal{O} comme l'ensemble des valeurs des différentes propriétés de \mathcal{O} . On nomme **espace des états** de l'objet concret \mathcal{O} , l'ensemble des états possibles de \mathcal{O} .

Cet espace est un sous ensemble strict du produit cartésien $\prod_{P \in p(O)} val(P)$. En effet, certains points de $\prod_{P \in p(O)} val(P)$ peuvent ne correspondre à aucun état de l'objet \mathcal{O} et ceci notamment du fait que certaines propriétés de \mathcal{O} sont liées par des **lois concrètes** qui limitent le domaine de valeurs de certaines propriétés en fonction d'autres (ainsi la pression, la température et le volume d'une mole d'un gaz ne peuvent être fixés indépendamment les uns des autres).

Pour un objet concret, cet espace ne peut être réduit à un singleton, ce qui signifie que les objets concrets sont le siège de **changements**, qu'ils sont mutables (aptes au changement).

Le passage d'un état s à un autre état s' de objet concret \mathcal{O} constitue un **événement** au sein de l'objet \mathcal{O} , on peut le noter $e = (s_d, s_f)$.

L'événement $e = (s_d, s_f)$ **précède** l'événement $e' = (s'_d, s'_f)$ et on note $e < e'$ si et seulement si l'état final du premier est identique à l'état initial du second. Dans ce cas il devient possible de composer des événements $e \circ e' = e'' = (s_d, s'_f)$.

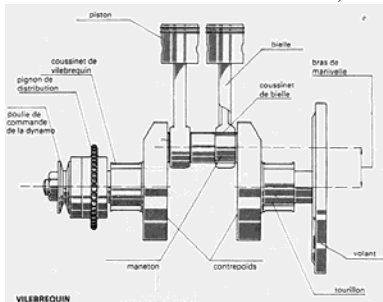
On définit alors un **processus** au sein de l'objet \mathcal{O} comme une suite finie d'événements ordonnée par la relation précède « < ». Un objet subit une **transformation** s'il est le siège de changement, c'est-à-dire d'une évolution de sa composition et/ou de son état.

5.1.2.6. Exemples de systèmes concrets

- **Exemple de système physique : l'équipage mobile d'un moteur à combustion interne.**

L'équipage mobile d'un moteur thermique est un système physique constitué d'un vilebrequin, de bielles et de pistons. Il s'agit ici d'un système dont la composition est constante pendant toute la durée de vie du système, aux changements de pièces et aux ré-usinages près. Ces différents constituants sont liés les uns aux autres par un ensemble de liaisons mécaniques permanentes : piston <-> bielle et bielle <-> vilebrequin qui sont des liaisons pivot. Le système est également lié à son environnement par des liaisons mécaniques du système avec son environnement, qui incluent les liaisons piston <-> cylindre, de la liaison vilebrequin <-> carter qui sont des liaisons permanentes et de la liaison vilebrequin <-> arbre primaire de transmission qui est une liaison débrayable.

L'environnement immédiat du système est donc constitué des chambres de combustion limitées par les cylindres et les charges combustibles confinées dans les chambres de combustion, le carter et le lubrifiant contenu dans le carter, l'arbre primaire de transmission.



L'équipage mobile réagit à des actions de son environnement en assurant une modification de forme (transformation) de mouvements rectilignes alternatifs subis en un mouvement rotatif continu $\omega(t)$ transmis tout en transmettant la presque totalité de l'énergie mécanique reçue

Toutefois sont associées de façon concomitante à ces réactions de vilebrequin des frottements (échauffements) des vibrations longitudinales (torsion du vilebrequin) des vibrations transversales et des bruits entraînant des altérations concomitantes du vilebrequin, « vieillissement », usure, fatigue, déformations plastiques et éventuellement rupture

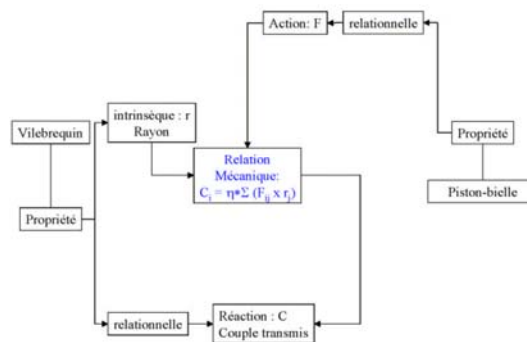


Figure 5.3. Réaction d'un vilebrequin.

- **Exemple de système physico-chimique : une charge combustible confinée dans une chambre de combustion.**

Les moteurs à combustion interne tirent parti d'une propriété chimique des charges combustibles : la combustion. Ces charges sont constituées d'un aérosol formé de gouttelettes de carburant vaporisées dans un volume d'air à l'état gazeux. Ces charges combustibles sont des systèmes physico-chimiques du début de l'injection jusqu'à la fin de la combustion.

Dans des conditions déterminées de pression, de température, de richesse et de configuration spatiale, ces systèmes voient leur composition évoluer pour passer idéalement d'une charge fraîche (par exemple, un mélange d'heptane $-C_7H_{16}-$ et d'air) en des gaz brûlés par des phénomènes de dissociations et de recombinaisons des molécules du mélange selon une équation chimique telle que $C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$

Lors de ce processus, le système va transmettre une part significative de son énergie sous la forme de chaleur mais aussi de travail mécanique. Ce travail mécanique est la traduction d'une action (force pressante) du système sur son environnement (le piston) comme la chaleur transmise est également la traduction d'une action du système sur son environnement (le cylindre et le conduit d'échappement).

- **Exemple de système physique : Le groupe moto propulseur d'un véhicule.**

Il s'agit d'un système concret dont :

- la composition comporte un moteur (généralement thermique) et d'une transmission (souvent une boîte de vitesse) et éventuellement un embrayage intégrés suivant différentes liaisons internes (liaison moteur - transmission) et externes (liaison transmission - arbres de roues, liaison moteur - châssis)
- l'environnement inclut le véhicule qu'il tracte (mais pas uniquement) et
- la structure statique décrite l'ensemble liaisons internes (entre le moteur et la transmission) et externes (entre la transmission et les arbres de roues, entre le moteur et le châssis)
- la structure dynamique décrite l'ensemble des actions et réactions internes (entre le moteur et la transmission) et externes (entre la transmission et les arbres de roues, entre le moteur et le châssis).

La liaison externe (transmission, arbres de roues) est le support d'actions de contact du GMP sur le véhicule et inversement.

Le couple moteur ou frein C_{roue} appliqué par le GMP à un véhicule de masse M_{vhl} , de rayon de roue R_{roue} , de coefficient Cd et de section droite A (propriétés intrinsèques), se déplaçant sur une chaussée

plane de coefficient d'adhérence f_{roll} à une vitesse v_{vhl} (propriétés relationnelles) imprime au véhicule une variation de vitesse γ_{vhl} (propriété relationnelle).

$$M_{vhl} * \Gamma_{vhl} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} - \frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{vhl}^2 - f_{roll} * M_{vhl} * g$$

Figure 5.4. Effet du couple exercé (à la roue) par le GMP sur l'accélération d'un véhicule.

- **Exemple de système social : L'équipe de développement d'un nouveau groupe motopropulseur.**

Il s'agit d'un système concret dont :

- la composition inclut un certain nombre (variable) de personnes (systèmes biologiques doués de raison, de créativité et entretenant des relations sociales),
- l'environnement inclut un certain nombre (variable) d'autres groupes sociaux situés au sein d'une ou plusieurs entreprises et des **artefacts** (dossiers de définition et de justification de définition du GMP en développement, des maquettes ou des prototypes du GMP en cours de définition, des produits et des outils de développement tels que des plateformes de développement, des bancs d'essais
- la structure inclut liens sociaux et interactions sociales tant internes qu'externes (pouvoir, d'échange et d'appartenance) : relations de domination et de soumission, des relations de coopération, mais aussi d'affrontement ou de neutralisation.

5.1.3. Systèmes conceptuels

Les **systèmes conceptuels** Σ sont des systèmes dont la composition $\mathcal{C}(\Sigma)$ est formée d'**objets abstraits** (concepts, prédicats, propositions, théorèmes, théories, corps de connaissances, pensés par des êtres raisonnables) dont l'environnement $\mathcal{E}(\Sigma)$ est formé d'**objets abstraits** ou **concrets**, selon le système dont il s'agit, et dont la structure $\mathcal{S}(\Sigma)$ est formée de **relations formelles**.

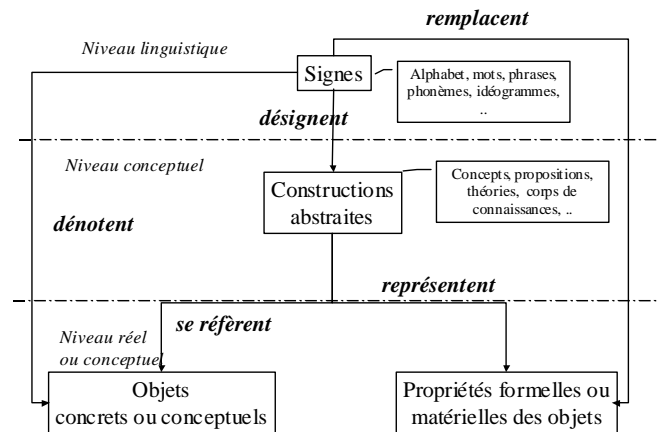


Figure 5.4. Les mots et les choses.

Les objets abstraits composant un système conceptuel sont désignés par des **signes**, qui au niveau linguistique, sont des marques physiques sur un support. Les signes (des) langage(s) sont des objets

concrets qui permettent de désigner des constructions abstraites et constituent une partie de l'environnement des systèmes conceptuels. Il s'agit d'un environnement concret $\mathcal{E}_\rho(\Sigma)$.

Ainsi le signe $M_{\text{vhl}} * \Gamma_{\text{vhl}} = \frac{C_{\text{roue}}}{R_{\text{roue}}} - \frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{\text{vhl}}^2 - f_{\text{roll}} * M_{\text{vhl}} * g$ désigne une relation mathématique exprimant l'égalité deux termes abstraits désignés par ' $M_{\text{vhl}} * \Gamma_{\text{vhl}}$ ' et par ' $\frac{C_{\text{roue}}}{R_{\text{roue}}} - \frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{\text{vhl}}^2 - f_{\text{roll}} * M_{\text{vhl}} * g$ '.

Cette construction conceptuelle est généralement désignée comme l'expression de « **la dynamique longitudinale d'un véhicule** ». Cette construction conceptuelle **se réfère** (in fine) à une classe de véhicules automobiles réellement existants immergés dans l'atmosphère terrestre réelle (au repos, absence supposée de vent) et qui se déplacent de façon rectiligne sur une surface réelle supposée horizontale. Les référents de cette construction sont donc réels ou factuels. D'autre part, des constituants de cette construction conceptuelle **représentent** des propriétés matérielles des objets auxquelles cette construction se réfère. On trouve ainsi dans cette construction des représentations du couple C_{roue} appliqué en sortie par le Groupe Moto Propulseur (sous système Moteur - Transmission) aux roues du véhicule de rayon R_{roue} , la masse M_{vhl} , l'accélération Γ_{vhl} , la vitesse v_{vhl} , la section droite A du véhicule et son coefficient de traînée aérodynamique c_d , la masse volumique de l'air ρ au lieu où se situe le véhicule, le coefficient de résistance au roulement de la liaison roue/ surface de roulement f_{roll} et enfin g l'accélération de la pesanteur du lieu où se situe le véhicule.

On trouve donc à ce niveau, un second environnement $\mathcal{E}_R(\Sigma)$ auquel le système conceptuel Σ se réfère et dont il représente les propriétés formelles ou matérielles selon qu'il s'agit d'un environnement conceptuel ou matériel. L'environnement $\mathcal{E}(\Sigma)$ d'un système conceptuel Σ est donc constitué de deux composantes $\mathcal{E}_\rho(\Sigma)$ symbolique et $\mathcal{E}_R(\Sigma)$ conceptuelle ou concrète. Les relations existantes entre ces environnements $\mathcal{E}_\rho(\Sigma)$ et $\mathcal{E}_R(\Sigma)$ et le système conceptuel $\mathcal{C}(\Sigma)$ lui-même sont d'une part des relations de désignation et d'autre part des relations de référence/représentation. Il s'agit de relations conceptuelles.

Nous nous intéressons tout particulièrement aux systèmes conceptuels ayant des référents concrets.

5.1.3.1. Modèles et interprétations

Le terme de '*modèle*' désigne plusieurs notions différentes. Aussi est-il nécessaire de préciser le sens dans lequel nous l'utilisons.

- La notion mathématique de modèle,

On parle par exemple de modèles en mathématique pour parler de spécialisations ou d'interprétations I de théories plus générales G. Ainsi par exemple, la théorie du calcul des propositions et la théorie des ensembles partiellement ordonnés constituent deux modèles distincts de la théorie des treillis. De même les entiers relatifs $(\mathbb{Z}, +, *, 0, 1)$ constituent un modèle de la théorie des anneaux commutatifs.

A noter qu'à cette notion de modèle et de théorie des modèles est également associée la notion de **vérité formelle** telle que l'a développée Tarski [MEN 64]. En logique mathématique, on dit qu'une expression bien formée (syntaxiquement correcte) A par rapport à une grammaire G est vraie pour l'interprétation I si toute séquence de valeurs de I satisfait A, elle est dite fautive dans le cas contraire. De plus I est un modèle de G si toutes les expressions (bien formées) de G sont vraies pour I. En d'autres termes, la vérité formelle est une affaire mathématique mathématique, et n'a pas grand-chose à voir avec les réalités concrètes.

- La notion figurative et suggestive de modèle

On a également l'habitude de désigner sous le terme de modèles des représentations figuratives d'objets concrets. Ces représentations figuratives ont certainement une fonction heuristique dans la mesure où elles servent de support à la réflexion des inventeurs d'une théorie. Mais elles ont aussi et principalement une fonction rhétorique, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un procédé, qui par sa force de suggestion, est destiné à favoriser l'adhésion d'une communauté de pairs à une construction nouvelle.

Il en est ainsi du « modèle de Bohr » figuré sur le dessin ci-dessous utilisé pour donner une représentation imagée à partir de laquelle l'idée de « saut quantique » peut être imaginativement appréhendée. Il en est de même du « Modèle de Crick et Watson » concernant la structure des acides nucléiques (ADN) à partir duquel il devient possible de se figurer les phénomènes de réplication à partir d'agencement spatiaux.

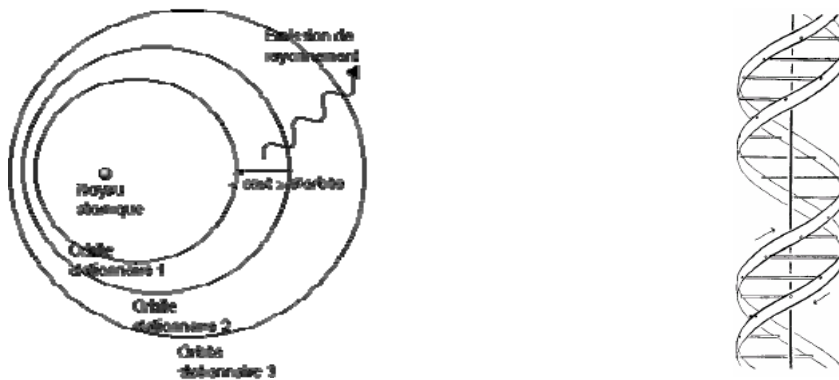


Figure 5.5. Les modèles de Bohr et de Crick et Watson

- La notion conceptuelle de modèle

Nous appelons également Modèle, une représentation conceptuelle **idéalisée** d'un objet ou d'un système concret par laquelle est établie une correspondance entre certaines propriétés matérielles du référent concret et certaines propriétés formelles de la représentation. Cette représentation conceptuelle peut être illustrée, ou non, par un schéma figuratif. Mais dans le premier cas, ce qui importe, c'est plus la légende du dessin que le dessin.

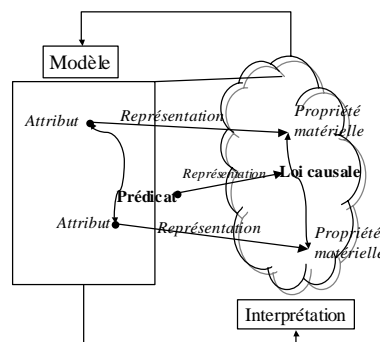


Figure 5.6. Modèles conceptuels et interprétations.

Ces représentations conceptuelles **idéalisées** d'un objet ou d'un système concret sont ensuite destinées à supporter un appareil hypothético-déductif, en d'autres termes une théorie. A défaut d'un tel appareillage théorique le rôle du modèle ne peut être limité qu'à un rôle heuristique et rhétorique comme évoqué ci-dessus. Ce qui stérilise une part importante du potentiel de la modélisation.

5.1.3.2. Théories et théories spécifiques

Les entités de la composition $\mathcal{C}(\Sigma)$ d'un système conceptuel Σ ne sont évidemment pas liées dans une seule construction conceptuelle mais s'inscrivent dans le cadre d'une **théorie**, c'est-à-dire dans un « système hypothético-déductif » de constructions conceptuelles entretenant les unes avec les autres des relations de déduction.

Ainsi, la construction conceptuelle précédente

$$(M_{vhl} * \Gamma_{vhl} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} - \frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{vhl}^2 - f_{roll} * M_{vhl} * g)$$

s'inscrit dans le cadre d'une théorie particulière qui est la théorie de la dynamique des véhicules dans laquelle on peut trouver des constructions conceptuelles représentatives de la dynamique transversale (lacet) mais aussi du roulis et du tangage des véhicules automobiles.

Nous appelons théorie concrète une théorie liant des entités conceptuelles dont les référents sont concrets. La théorie constitue alors la structure du système conceptuel correspondant. Ces théories concrètes ne sortent pas du néant mais résultent généralement de l'application au **modèle** d'une situation concrète et de ses référents d'une théorie plus générale, voire abstraite. Ainsi, les constructions conceptuelles particulières aux véhicules qui constituent la théorie de la dynamique des véhicules automobiles ne sortent pas du néant mais sont une déclinaison particulière ou encore une **interprétation** particulière d'une théorie concrète plus générale : la mécanique générale appliquée à un **modèle** de véhicule.

On retrouve d'ailleurs bien le premier théorème de la dynamique des solides ($F = m\Gamma$) à peine camouflé derrière la construction particulière : $M_{vhl} * \Gamma_{vhl} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} - \frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{vhl}^2 - f_{roll} * M_{vhl} * g$.

On peut pousser plus loin l'analyse des antécédents de la théorie particulière. Il apparaît alors que la mécanique générale constitue une interprétation particulière d'une théorie mathématique plus générale (qui est sans référents concrets), la théorie des équations différentielles. De là, il est possible de remonter au calcul différentiel et intégral puis à la topologie etc.,

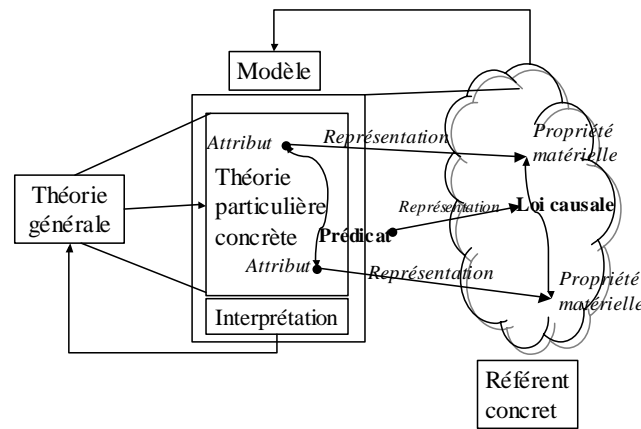


Figure 5.7. Théories générales et théories spécifiques.

Trois propriétés fondamentales caractérisent les théories concrètes :

- Elles sont incomplètes,

Ces théories concrètes particulières sont incomplètes d'un double point de vue : certaines constructions de la théorie particulière, pourtant bien formées, peuvent être écartées parce qu'elles ne correspondent à aucune réalité concrète (des pans entiers des domaines ouverts par les équations de la mécanique répondent à ce critère). Le modèle contient alors des constructions sans référents concrets. Inversement, des propriétés matérielles peuvent ne pas être prises en compte dans le modèle ou dans la théorie particulière, certaines peuvent être même inconnues. La situation où il existerait une bijection (ou un isomorphisme) entre un modèle et son référent réel est donc une vue de l'esprit. Ceci semble donc régler la question du modèle exhaustif d'un système concret que certains poursuivent, il s'agit d'une chimère.

- Elles sont, dans le meilleur des cas, approximativement vraies,

La question de la vérité des théories concrètes ne se pose pas de façon binaire comme on y est accoutumé en calcul logique des propositions (vérité formelle). Ainsi la construction conceptuelle

$$M_{vhl} * \Gamma_{vhl} = \frac{C_{roue}}{R_{roue}} - \frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{vhl}^2 - f_{roll} * M_{vhl} * g$$

ne peut pas être tenue pour vraie de façon définitive. Elle est, en fait, approximativement vraie, c'est-à-dire, que les résultats obtenus par calcul à partir de cette expression sont « assez voisins » des mesures qui seraient faites lors d'essais réels sur un véhicule concret tant que certaines conditions d'essai restent satisfaites. C'est-à-dire, tant que l'action du vent peut être négligée, que la pente de la surface de roulement peut être négligée, tant que le coefficient de résistance au roulement de la liaison roue/surface peut être considéré comme correctement identifié, tant que le véhicule peut être assimilé à un solide indéformable.

- Elles sont faillibles, c'est-à-dire qu'éventuellement, elles peuvent être mises en défaut à l'occasion d'expériences.

Un essai peut mettre en défaut une prévision réalisée à partir d'un modèle et d'une théorie concrète. Si les résultats de l'essai ne peuvent être mis en cause, ils constituent alors une réfutation du modèle (inadéquation de l'idéalisation proposée par le modèle), de la théorie concrète (inexactitude de la théorie particulière), voir de façon plus exceptionnelle de la théorie générale sous-jacente. De ce fait, les

prédictions rendues possibles grâce aux constructions concrètes utilisées dans le cadre d'une théorie concrète sont d'autant plus dignes de confiance que les justifications apportées lors de leurs constructions sont rigoureuses et que les réfutations auxquelles elles ont été confrontées ont échouées.

5.1.3.3. Modèles de simulation

Les modèles de simulation, largement utilisés dans l'industrie, constituent des exemples aboutis de cette notion de théories spécifiques.

Ainsi, l'industrie automobile a développé de nombreux systèmes de modélisation/simulation des véhicules qu'elle conçoit et produit. Ces simulations permettent d'anticiper certains aspects du comportement de ces véhicules avant que ceux-ci n'existent physiquement.

Ces systèmes de simulation reposent généralement sur des bibliothèques de composants que l'ingénieur sélectionne, adapte si besoin, puis assemble ensuite. Chaque composant inclut à la fois une dimension :

- conceptuelle d'un modèle objet idéalisant le composant réel en un ensemble de propriétés caractéristiques,
- hypothético-déductive d'une théorie spécifique liant les propriétés caractéristiques à des « inputs » simulés,
- figurative qui donne une impression et l'illusion d'un réalisme augmenté.

La figure ci-dessous donne une représentation de la troisième dimension (figurative/métaphorique) de ce type de simulation.

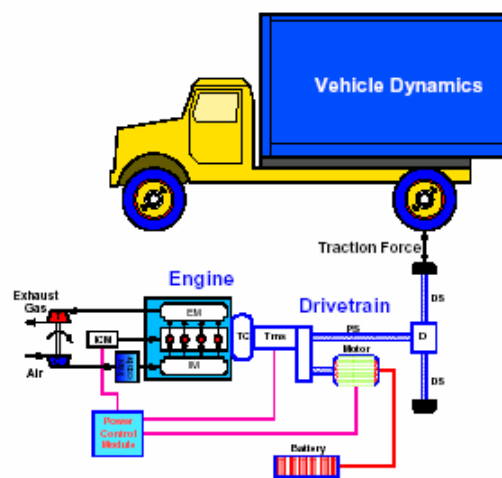


Figure 5.8. Représentation figurative dans un modèle de simulation

On y « voit » un véhicule, un moteur thermique, une machine électrique et une batterie, ainsi qu'un module de contrôle/commande, mais ce « modèle » ne dit presque rien. Derrière ce décor, le modèle de simulation retient pour chaque composant les différentes variables (entrées, états, sorties) qui représentent conceptuellement le composant. Enfin, le modèle de simulation retient pour chaque composant une théorie spécifique c'est-à-dire une loi d'évolution qui représentent le comportement du composant en fonction des stimulations qu'il subit.

Un modèle de simulation permet donc d'anticiper, avec des degrés de confiance variables, certains aspects du comportement du système simulé et donc de déterminer certaines de ses actions sur son

environnement ou de ses réactions aux sollicitations de son environnement dans des conditions déterminées.

5.1.3.4. *Connaissances et corps de connaissances*

Les connaissances relatives à un domaine du savoir (le domaine des sciences physiques, des sciences de l’homme, par exemple) se présentent comme « des collections » de faits relatifs à ce domaines et de règles d’inférence pertinentes dans ce domaine.

Dans un domaine du savoir, les définitions, les axiomes, les hypothèses et les assertions, les lois théoriques et expérimentales que nous tenons pour vraies constituent des faits, tandis que des règles d’inférence, l’analogie, la récurrence ou l’induction incomplète se retrouvent dans les sciences exactes ou les raisonnements empiriques.

Les connaissances (qu’elles soient empiriques ou théoriques) sont **tenues pour vraies** par ceux qui les manipulent. Elles sont néanmoins potentiellement **faillibles**, c’est-à-dire qu’elles peuvent être réfutées. Un fait contraire peut leur être opposé ou un biais peut être mis en évidence dans un raisonnement. Cependant elles sont d’autant plus **robustes** qu’elles sont **justifiées** par ceux qui les mettent en œuvre et qu’elles ont résisté à des processus de **réfutation**.

D’autre part, les connaissances d’un domaine du savoir peuvent être d’ordre individuel. Elles vivent en chacun des « sachants » du domaine, mais peuvent être difficiles à exprimer. Ce sont les **connaissances tacites** qui peuvent être inséparables des individus qui les détiennent et des contextes dans lesquels elles ont été élaborées, étant donné qu’elles rassemblent le savoir-faire et la compétence de ces individus. Nous parlons également de **connaissances subjectives** c’est-à-dire de connaissances attachées spécifiquement à des sujets (par exemple, le diagnostic « à l’oreille » de certains réparateurs d’automobiles).

A l’autre bout du spectre, les connaissances d’un domaine du savoir peuvent être largement formalisées. Ce sont les **connaissances explicites** qui correspondent à des connaissances formalisées, en particulier dans les documents (documents de spécification, de conception, de justification), les ouvrages magistraux, les procédures, règlements, instructions, standards, etc.. Dans ce second registre, nous parlons de **connaissances intersubjectives** c’est-à-dire de connaissances non plus attachées spécifiquement à des sujets mais partagées par une communauté de « sachants ».

Les processus par lesquelles des connaissances changent de statut sont décrits ci-dessous :


| | | |
|---|------------------------------|---------------------------------|
|  | Connaissances subjectives | Connaissances Inter-subjectives |
| Connaissances subjectives | Processus de socialisation | Processus de formalisation |
| Connaissances Inter-subjectives | Processus de intériorisation | Processus de combinaison |

Figure 5.9. *Processus d’évolution des connaissances*

- La **socialisation**: L'apprenti en observant son tuteur exercer son métier, s'approprie ses gestes grâce à l'imitation et la pratique.
- La **formalisation**: permet à des connaissances tacites de trouver une formulation. Ainsi des connaissances peuvent être explicitées afin d'être partagées par une communauté de pairs.
- L'**intériorisation**: A force de répétition, les connaissances explicites, s'inscrivent chez un individu qui les assimilent sous la forme d'un savoir faire plus ou moins incorporé. L'intériorisation est un condition nécessaire de la transmission du savoir.
- La **combinaison**: par le biais d'un langage commun et grâce à la communication les connaissances explicites des individus s'associent et se confrontent pour donner naissance à des nouvelles connaissances partagées par une communauté de pairs dans un processus dialectique d'argumentation, de justification et de réfutation.

Selon nous, les processus d'ingénierie doivent permettre une amélioration de l'acquisition, la capitalisation et le renouvellement des connaissances dans une communauté de projet.

Notre approche des processus d'ingénierie dans sa triple dimension (instrumentale, cognitive et d'accord) et en particulier sa dimension consensuelle (recherche d'accords) permet de répondre à cette exigence.

5.2. Les hiérarchies de systèmes concrets

5.2.1. Systèmes, sous-systèmes et sur-systèmes

Deux systèmes $\Sigma = (\mathcal{C}(\Sigma), \mathcal{E}(\Sigma), \mathcal{S}(\Sigma))$ et $\sigma = (\mathcal{C}(\sigma), \mathcal{E}(\sigma), \mathcal{S}(\sigma))$ étant donnés, le premier σ est un **sous-système** du second Σ et réciproquement Σ est un **sur système de** σ si et seulement si :

- $\mathcal{C}(\sigma)$ est une partie de $\mathcal{C}(\Sigma)$ (i.e tous les composants de σ sont des composants de Σ),
- $\mathcal{E}(\sigma)$ est une partie de $\mathcal{E}(\Sigma)$ (i.e tous les objets situés dans l'environnement de σ sont dans l'environnement de Σ),
- $\mathcal{S}(\sigma)$ est une partie de $\mathcal{S}(\Sigma)$ (i.e la structure de σ est incluse dans la structure de Σ),

Ainsi le moteur thermique d'un véhicule automobile conventionnel est un sous-système du groupe motopropulseur qui est lui-même un sous système du système véhicule. L'équipage mobile du moteur thermique est bien sûr un sous système de ce dernier.

5.2.2. Structure de décomposition d'un système.

Etant donné un système concret $\Sigma = (\mathcal{C}(\Sigma), \mathcal{E}(\Sigma), \mathcal{S}(\Sigma))$ et une classe d'objets concrets A alors :

- La composition $\mathcal{C}_A(\Sigma)$ de Σ suivant A est l'ensemble des objets concrets de A qui composent Σ ,
- L'environnement $\mathcal{E}_A(\Sigma)$ de Σ suivant A est l'ensemble des objets concrets de A qui composent $\mathcal{E}(\Sigma)$,
- La structure de $\mathcal{S}_A(\Sigma)$ de Σ suivant A est l'ensemble liaisons et des interactions de $\mathcal{S}(\Sigma)$ qui sont définies sur $\mathcal{C}_A(\Sigma) \cup \mathcal{E}_A(\Sigma)$.

Ainsi pour un véhicule automobile VHL = $(\mathcal{C}(\text{VHL}), \mathcal{E}(\text{VHL}), \mathcal{S}(\text{VHL}))$, si on prend pour la classe A, la classe GMP constituée par le Moteur Mth et la Transmission, alors $\mathcal{C}_{\text{GMP}}(\text{VHL}) = \text{GMP}$, $\mathcal{E}_{\text{GMP}}(\text{VHL}) = \emptyset$ et $\mathcal{S}_{\text{GMP}}(\text{VHL})$ est l'ensemble des interactions définies sur GMP c'est-à-dire l'ensemble des actions et des réactions définies sur GMP.

Soit $N = (N_i)_{1 \leq i \leq p}$ une famille d'ensembles N_i d'objets concrets variant de N_0 à N_i . Nous dirons que :

- le niveau N_i précède le niveau N_j si et seulement si tous les objets concrets appartenant au niveau N_j sont composés d'objets du niveau N_i ,
- l'objet concret A appartient au niveau N_i si et seulement si tous les objets concrets qui le composent appartiennent à des niveaux précédant le niveau N_j , i.e. $\mathcal{C}(A) \subset \bigcup_{i=j+1}^p N_i$

Ainsi pour un véhicule automobile $VHL = (\mathcal{C}(VHL), \mathcal{E}(VHL), \mathcal{S}(VHL))$, il est par exemple, possible de structurer celui-ci en 5 niveaux : N_0 .le véhicule en tant que tel, N_1 .les sous systèmes du véhicule, N_2 .les organes des sous systèmes, N_3 .les assemblages des organes, et enfin N_4 .les pièces des assemblages.

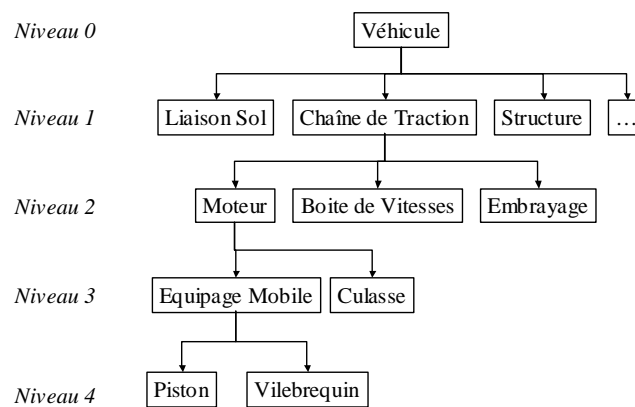


Figure 5.10. Structure de décomposition d'un véhicule automobile.

Il donne également accès à la composition en sous-systèmes $\mathcal{C}_{\text{sous-systèmes}}(VHL)$ du véhicule ou à sa composition en organes $\mathcal{C}_{\text{organes}}(VHL)$, en assemblages $\mathcal{C}_{\text{assemblages}}(VHL)$ et enfin en pièces $\mathcal{C}_{\text{pièces}}(VHL)$. Ceci nous permet d'obtenir la structure de décomposition du système (system breakdown structure ou SBS) ou encore arborescence du système.

5.2.3. Propriétés résultantes et émergentes

Etant donné un système $\Sigma = (\mathcal{C}(\Sigma), \mathcal{E}(\Sigma), \mathcal{S}(\Sigma))$, une **propriété** P de Σ est une **propriété résultante** de Σ si P est également une propriété d'au moins une partie propre de Σ . En revanche, une **propriété** P de Σ est une **propriété émergente** de Σ si aucune partie propre de Σ ne possédait préalablement P comme propriété.

Ainsi l'aptitude à transporter de façon autonome des passagers n'est sûrement pas une propriété résultante du véhicule puisque aucun de ses sous-systèmes ne dispose déjà de cette propriété alors que d'autres systèmes la possèdent également : le train à vapeur, l'avion mais aussi le cheval.

Certains auteurs lient la notion d'émergence à celle de complexité. L'émergence constitue alors une manifestation de la complexité. Ainsi, l'autopoïèse (auto-production) des organismes vivants, propriété émergente entre toutes, serait la marque de la complexité du vivant. Nous ne partageons pas cette vue, émergence et complexité sont étrangères l'une à l'autre. En effet, tout système concret, quel qu'il soit, aussi élémentaire soit-il, possède des propriétés émergentes vis-à-vis des propriétés possédées par ses

constituants. L'émergence est la marque distinctive des systèmes. Une théorie de la complexité des systèmes techniques reste selon nous à élaborer.

Nous appelons **genèse** d'un système, le processus par lequel un système concret se constitue en tant que tel, c'est-à-dire passe d'une collection d'objets indépendants à un composé d'objets concrets constitué comme un tout et ayant des interactions entre eux et avec l'environnement. Ses propriétés émergentes forment son **identité** (et non son nom) et son **intégrité**. Pendant toute la durée de sa vie, le système conserve son intégrité et à l'autre bout de son cycle de vie, nous appelons **corruption**, le processus par lequel le système cesse d'opérer comme un tout, perd ses propriétés émergentes, c'est-à-dire se désintègre.

Les sciences de la nature et de l'homme autorisent à penser que les systèmes concrets se constituent à partir des composants qui leur préexistent par un processus d'assemblage, de **synthèse** et d'organisation. Il en va ainsi des galaxies mais aussi des organismes vivants et des artefacts.

5.3. Les systèmes techniques

Mario Bunge situe les systèmes techniques au sommet de la pyramide des systèmes concrets qui forment le « mobilier de monde »(voir annexe 3). Cette position ne leur confère aucune supériorité particulière, (ni métaphysique, ni sociale), mais doit être ramenée aux interprétations factuelles suivantes :

- pour qu'un techno système puisse exister, il faut que de êtres doués de raison et de créativité, mais aussi désirants, vivant en société, aient pu le créer afin de l'utiliser.
- un système technique est constitué d'humains et d'artefacts, ces derniers étant inventés et produits par des humains.

Il existe donc une préséance constitutive des humains sur les artefacts et sur les systèmes techniques, tout comme il existe une préséance du physique sur le chimique, etc.

5.3.1. « *Le facteur humain* »

La première catégorie de composants des systèmes techniques couvrent l'ensemble des parties prenantes du système, à savoir les utilisateurs et exploitants, les acquéreurs, les concepteurs, les producteurs, ceux qui assurent la maintenance et le recyclage des artefacts du système. La composante humaine d'un système technique varie pendant le cycle de vie du système.

Il s'agit d'humains caractérisés par :

- Des propriétés intrinsèques (anthropométriques) et relationnelles (biomédicales) leur offrant des capacités mais aussi des limitations d'ordre biologique. Sous cet aspect, il s'agit de bio systèmes (voir annexe 3).
- Des propriétés perceptives, cognitives, motrices, rationnelles mais aussi affectives leur offrant des capacités mais aussi des limitations d'ordre psychologique. Sous cet aspect, il s'agit de bio psycho systèmes (voir annexe 3).
- Des propriétés d'échange, de communication, de partage et d'entente mais aussi de conflit leur offrant des capacités mais aussi des limitations d'ordre sociologique. Sous cet aspect, il s'agit de composants de socio systèmes (voir annexe 3).
- l'appartenance à des groupes sociaux multiples qui impliquent des interactions sociales régies pour partie par des valeurs et des normes sociales.
- un comportement souvent rationnel (c'est-à-dire adapté aux situations rencontrées et aux buts poursuivis) mais pas toujours,

- une capacité de création, c'est-à-dire, une capacité à établir des rapports entre des entités préalablement sans liens. Cette mise en rapport d'éléments épars permet l'émergence de nouvelles propriétés spécifiques du tout ainsi formé. Le tout ainsi formé n'est plus un ensemble d'entités indépendantes mais constitue un nouvel objet²¹ (concret ou abstrait).

Ces caractéristiques multiples et complexes devraient placer, selon nous, l'ingénierie humaine au centre de l'ingénierie des systèmes techniques.

5.3.2. Les artefacts

Nous définissons ensuite la seconde catégorie de composants des systèmes techniques, les artefacts comme des objets concrets :

- développés (conçus et produits) par des êtres raisonnables et créatifs,
- résultat d'actes volontaires de ces derniers, et qui auraient pu ne pas être ou bien qui auraient pu être autrement que ce qu'ils sont,
- destinés à être utilisés par d'autres (êtres raisonnables et créatifs).

La composante artefactuelle d'un système technique varie également pendant le cycle de vie du système. Elle comprend des produits finals et des produits support au sens l'EIA-632 les a définis (chapitre 2.2.1).

A la différence des systèmes naturels, les artefacts répondent à une **intention** de leurs producteurs et/ou leurs utilisateurs. Dès lors la connaissance d'un artefact ne peut se limiter à la détermination de sa **cause efficiente**, c'est-à-dire des lois physico-chimiques qui déterminent son fonctionnement. Sa connaissance requiert également une compréhension de sa **cause intentionnelle** (finale) c'est-à-dire des buts que ses concepteurs et ses utilisateurs lui ont assignés. En d'autres termes, les explications causales ne suffisent pas et elles doivent être complétées par des explications des buts poursuivis (téléologiques). Si l'activité scientifique peut se satisfaire de la connaissance de la cause efficiente, l'activité technique requiert également une connaissance de la cause intentionnelle. Cette intention est située toujours, selon nous, dans la modification de l'état de l'environnement du système, en d'autres termes, un système est toujours conçu dans le but de modifier l'état de son environnement.

5.3.3. Les systèmes techniques

Ainsi les systèmes techniques sont définis comme des systèmes concrets dont

- la composition $\mathcal{C}(\Sigma)$ comprend d'une part des artefacts $\mathcal{A}(\Sigma)$ et d'autre part des humains considérés comme des êtres raisonnables et créatifs $\mathcal{H}(\Sigma)$,
- l'environnement $\mathcal{E}(\Sigma)$ est constitué d'un environnement matériel (ensemble d'objets concrets de genre quelconque) $\mathcal{EM}(\Sigma)$ et d'un environnement humain $\mathcal{EH}(\Sigma)$,
- et la structure $\mathcal{S}(\Sigma)$ peut être scindée en deux parties :
 - $\mathcal{F}(\Sigma)$ qui représente l'ensemble des liens matériels et des interactions matérielles,
 - $\mathcal{R}(\Sigma)$ qui représente l'ensemble des liens sociaux et des interactions sociales.

Le tableau suivant synthétise les types d'interactions apparaissant dans la structure du système à partir des définitions précédentes :

²¹ Il en est ainsi, par exemple, de la création poétique comme l'illustre ces vers de Mallarmé:

« Et j'ai cru voir la fée au chapeau de clarté
 Qui jadis sur mes beaux sommeils d'enfant gâté
 Passait, laissant toujours de ses mains mal fermées
 Neiger de blancs bouquets d'étoiles parfumées. »

| | Composition $\mathcal{C}(\Sigma)$ | | Environnement $\mathcal{E}(\Sigma)$ | |
|-----------------------|--|--|---|---|
| | $\mathcal{A}(\Sigma)$ | $\mathcal{H}(\Sigma)$ | $\mathcal{EM}(\Sigma)$ | $\mathcal{EH}(\Sigma)$ |
| $\mathcal{A}(\Sigma)$ | Interactions matérielles entre les différents artefacts du système | Interactions matérielles entre les différents artefacts et agents du système | Interactions matérielles entre les artefacts du système et l'environnement matériel | Interactions matérielles entre les artefacts du système et l'environnement humain |
| $\mathcal{H}(\Sigma)$ | | Interactions sociales entre les différents agents du système | Interactions matérielles entre les agents du système et l'environnement matériel | Interactions sociales entre les agents du système et l'environnement humain |

Les interactions matérielles entre constituants et environnement d'une part et les interactions sociales entre les agents et l'environnement humain d'autre part se déroulent suivant des scénarios largement prescrits à l'avance et qui s'inscrivent dans les différents **processus du cycle de vie du système** : processus de développement, d'exploitation, de maintien en condition opérationnelle et de démantèlement du système. Les interactions se déroulent donc dans le cadre de **processus réels** largement déterminés (mais pas totalement) par des **processus prescrits** lors de la conception du système.

La conception d'un système technique ne se réduit donc pas à la conception de ses artefacts mais inclus également la conception d'un emploi de ces artefacts par les acteurs du système technique.

Un centre de recherche et de développement constitue un exemple de système technique :

- formés de dirigeants, d'ingénieurs et de techniciens, de maquettes et de prototypes, de moyens d'études et d'essais,
- immergé dans un environnement de fournisseurs et de prestataires et de produits
- structuré par un réseau de relations sociales (contrôle, commandement, coopération, coordination), mais aussi de relations de production intellectuelle et manuelle.

De façon similaire, un véhicule VHL constitue un autre exemple de système technique,

- constitué du véhicule proprement dit $\mathcal{A}(\text{VHL})$, de son conducteur et de ses passagers, $\mathcal{H}(\text{VHL})$
- immergé dans un environnement « naturel », routes, autoroutes, circuits urbains et périurbains $\mathcal{EM}(\text{VHL})$ mais aussi social de fournisseurs (pompistes, réparateurs) mais aussi de contrôle (police, ...) $\mathcal{EH}(\text{VHL})$,
- structuré par un réseau de relations sociales réglées par des normes (code de la route, peur du gendarme), mais aussi d'interactions matérielles entre conducteur (conduite), passagers, réparateurs (entretien et réparation) et le véhicule.

5.3.4. Effets recherchés et concomitants.

Nous avons produit précédemment, (5.1.1, Systèmes), une définition des systèmes concrets qui n'évoque pas le concept de fonction, alors que le terme '*fonction*' est très systématiquement considéré comme un concept central de l'ingénierie et régulièrement défini comme un « *Effet recherché d'un système, d'un sous système d'un produit ou d'une pièce.* » [EN-1325].

En effet, nous estimons qu'un système Σ ne réalise pas stricto sensu des fonctions. Il agit sur son environnement $\mathcal{E}(\Sigma, t)$, (actions observables par l'intermédiaire des effets induits sur cet environnement) et réagit aux actions de l'environnement $\mathcal{E}(\Sigma, t)$. Ces actions et ces réactions définissent la structure dynamique $\mathcal{S}_d(\Sigma, t)$ de Σ . Le soleil, par exemple, n'a pas de fonction même s'il exerce ses effets sur tout les constituants du système solaire et sans doute très au-delà.

L'expression « *effet recherché* » suppose qu'un (ou plusieurs) acteur(s), recherche(nt) cet effet. Les systèmes naturels peuvent produire des effets auxquels certains accordent de l'intérêt, de la valeur mais ceci est un heureux concours de circonstances, une aubaine.

Les systèmes artificiels, c'est-à-dire les systèmes concrets résultants d'un travail humain, sont, quant à eux, synthétisés de façon à produire dans l'environnement l'effet recherché (la fonction) en tirant parti d'une propriété du système conçu. C'est à cet effet recherché et produit que certains accordent de l'intérêt, de la valeur. Toutefois, une propriété différente aurait pu être à l'origine d'un système réalisant la même fonction. Inversement, un système artificiel qui n'aurait (plus) aucune utilité (fonction) pourrait correspondre à ce que l'on nomme un déchet.

L'effet recherché au travers d'une utilisation du système ne vaut que pour cette utilisation particulière. Autrement dit, un système artificiel n'assure pas en tant que tel de fonctions mais s'il assure, c'est nécessairement pour quelqu'un ou pour quelque chose et dans un certain contexte.

A titre d'exemple, l'effet Joule, qui rend compte de la puissance thermique rayonnée par un conducteur traversé par un courant électrique. Cet effet n'est pas en soi désirable ou indésirable mais son attrait dépend de la situation « opérationnelle » dans laquelle il se situe. Dans le cas d'une maison équipée de convecteurs électriques, l'effet Joule est attendu, recherché par les occupants qui souhaitent se chauffer ; dans le cas d'un transport d'énergie électrique sur des lignes électriques, l'effet Joule est au contraire un effet indésirable, une perte pour l'exploitant.

De plus, réduire un système à ses fonctions (en fait à son utilité) a pour conséquence de masquer un fait massif et pourtant ignoré de tous les manuels d'analyse fonctionnelle, à savoir que les systèmes techniques ne produisent pas seulement des effets recherchés. Ils produisent également des effets non recherchés que nous avons appelés effets concomitants, et en particulier des effets indésirables voire intolérables.

Le concept de fonction n'est donc pas un concept technique, mais un concept économique²² ou pré économique. Les fonctions ne sont pas des propriétés intrinsèques des systèmes, mais des propriétés relationnelles qui associent des systèmes à des acteurs. Les systèmes sont investis de fonctions par des acteurs. Le système lui, produit des actions et des réactions (accessibles par le biais de leurs effets).

C'est parce que les systèmes réalisent des fonctions pour des acteurs qu'on peut leur attribuer une valeur d'usage. Ceci constitue la condition pour qu'ils aient une valeur d'échange et qu'ils puissent s'inscrire dans un circuit économique.

5.3.5 Fonctions et transformations.

Nous nous rangeons cependant à un solide usage²³ et que nous désignerons, malgré nos objections précédentes, les effets recherchés d'un système par l'expression « les fonctions du système ». Nous adoptons la définition du terme '*fonction*' proposée par la norme EN 1325-1 [EN 1325] :

Fonction : Effet recherché d'un système, d'un sous système d'un produit ou d'une pièce.

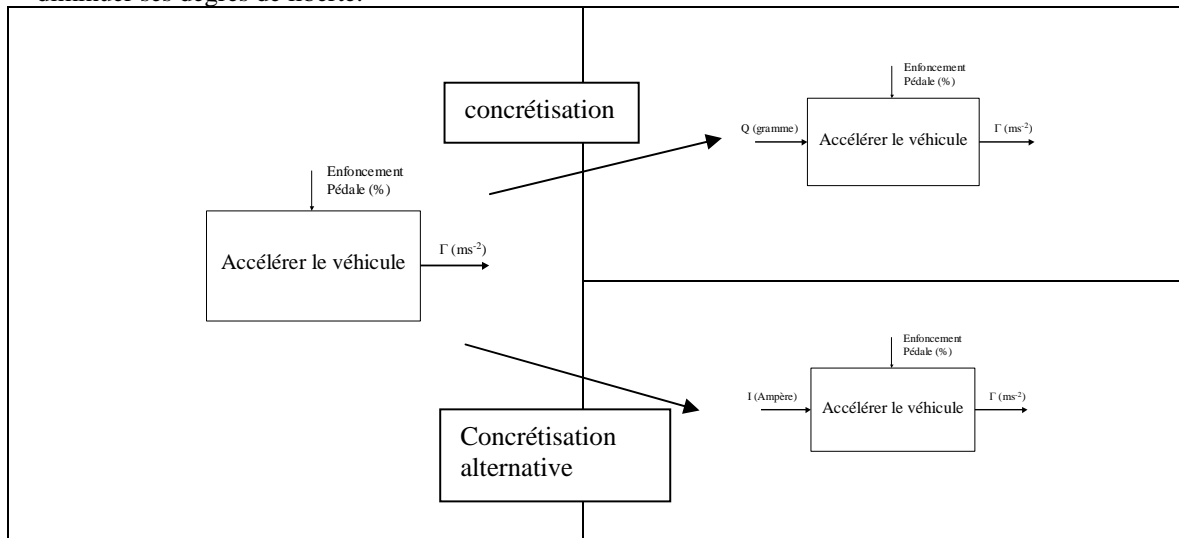
Toutefois, les fonctions du système ne seront, pour nous en aucun cas assimilés à des correspondances entre une (des) entrée(s) et une (des) sortie(s) du système. Les fonctions des systèmes concrets sont caractérisées par une (des) sortie(s) et éventuellement par des paramètres de réglage (paramètre de contrôle ou paramètre réglant). En revanche, une fonction d'un système concret n'est pas caractérisée par une (des) entrée(s).

²² On peut relier le concept de fonction à celui que les économistes désignent sous le terme d'utilité, et que ceux-ci relient à des techniques de recherche opérationnelle et/ou d'aide à la décision multi-critères

²³ Le sens des mots est donné par l'usage qu'en fait une communauté linguistique.

La donnée des entrées se situe à un niveau d'abstraction inférieur à celui de fonction. Nous disons qu'une **transformation** est une correspondance entre une (des) entrée(s) et une (des) sortie(s) du système.

Le passage d'un effet (recherché ou non) à une transformation s'effectue par l'intermédiaire d'un **acte de conception** (incluant un choix explicite ou implicite). Cet acte de conception a pour conséquence d'augmenter le degré de concrétisation par addition de déterminations supplémentaires et inversement de diminuer ses degrés de liberté.



Choisir des transformations et les combiner pour réaliser des effets recherchés (fonctions) ou pour neutraliser des effets indésirables constitue ce que nous appelons le **processus de conception fonctionnelle** ou de **conception logique** du système technique.

5.3.6 Modes et états de fonctionnement.

Dans la littérature, les notions de modes et d'états sont très largement évoqués mais aussi confondues au point que nous n'avons pu trouver une définition de ces notions qui introduise une différence entre les uns et les autres. Nous nous proposons ici de définir une notion de **mode** qui soit une notion clairement distincte de la notion d'**état** et de définir la relation qu'elles entretiennent l'une avec l'autre. Ceci a pour but de poser clairement la base d'une représentation logique d'un système.

5.3.6.1. Modes de fonctionnement

Le fonctionnement d'un système technique pendant un intervalle de temps Δt peut être scindé en modes de fonctionnement exclusifs que nous définissons comme des regroupements temporels d'actions ou de réactions réalisées pendant la même période.

A chaque mode de fonctionnement du système correspondent les fonctions que le système doit assurer dans ce mode. Par exemple, une batterie fonctionne en mode '*Charge*' si elle fonctionne en tant que récepteur de courant tandis qu'elle fonctionne en mode '*Décharge*' si elle délivre un courant à un récepteur. Une fonction peut être spécifique d'un mode, elle peut être aussi commune à plusieurs modes.

5.3.6.2. Commutations de modes de fonctionnement

Un système passe d'un mode à un autre par une **commutation de modes** qui est également une action ou une réaction du système.

Les modes et commutation de modes peuvent être valablement représentés à l'aide de diagrammes du type Statecharts [HAR 98], représentation graphique et hiérarchique classique d'états et de transition entre états, dues à David Harel. D'autres formalismes pourraient indubitablement convenir. Toutefois, il importe de noter que contrairement aux transitions des Statecharts supposées instantanées, les commutations entre modes sont souvent des opérations complexes dont la durée ne peut être généralement tenue pour négligeable et qui doit être bornée dans le temps.

Ces changements de mode sont réalisés selon des scénarios et des synchronisations à définir.

5.3.6.3. *Etats de fonctionnement*

Nous désignons par état de fonctionnement, à un instant, d'un système, la valeur d'une ou plusieurs propriétés du système à cet instant. Par exemple, nous pouvons définir l'état de charge d'une batterie, son SOC (state of charge) qui varie entre 0% (batterie vide) et 100% (batterie pleine).

Pour qu'un système fonctionne dans un mode donné, il peut être nécessaire qu'il soit dans un état particulier, le mode de fonctionnement est alors lié à l'état de fonctionnement. Inversement, dans un état donné, il peut ne pas pouvoir fonctionner dans un mode donné. Dans ce second cas, le mode de fonctionnement et l'état de fonctionnement sont alors incompatibles.

Les descriptions d'un système en termes d'états ou en termes de modes sont des descriptions duales. Aux différents modes de fonctionnement correspondent des **états de fonctionnement** du système qui s'imposent ou au contraire s'excluent.

Ainsi pour qu'une batterie puisse fonctionner en mode Charge, il faut que son état de charge (SOC) soit inférieur à un certain niveau (en théorie SOC=100%) de même pour qu'elle puisse fonctionner en mode Décharge, il faut que son état de charge (SOC) soit supérieur à un certain niveau (en théorie SOC=0%). Dans les cas contraires, les modes et les états sont incompatibles.

5.3.7 *Phylogénèse et ontogénèse des systèmes techniques*

Le terme « phylogénèse » appartient au vocabulaire de la théorie de l'évolution des espèces biologiques et désigne l'histoire évolutive des espèces, des lignées et des groupes d'organismes (biologiques). La théorie de l'évolution attribue à deux mécanismes complémentaires le dynamisme des espèces vivantes : la dérive génétique (mutations aléatoires) et la sélection naturelle [DAV 00]. Le terme « ontogénèse » vient, par contraste avec celui de phylogénèse, désigner l'histoire évolutive des individus d'une espèce vivante, de l'engendrement de l'individu à sa disparition.

Il est alors possible, par analogie, de parler de phylogénèse de systèmes techniques pour désigner l'histoire évolutive des lignées d'objets techniques comme par exemple la lignée des véhicules automobiles, ou des moteurs à combustion interne ou de n'importe quel autre artefact.

Tout artefact s'inscrit dans une lignée et il est possible d'en écrire, l'histoire évolutive. Ainsi André Leroi-Gourhan nous restitue-t-il dans le Geste et la Parole [LER 64] une phylogénèse des outils tranchants en silex du paléolithique et du mésolithique. Yves Deforge fait de même à propos des objets industriels contemporains [DEF 85].

Toutefois, les mécanismes de cette évolution ne sont plus la mutation aléatoire et la sélection naturelle, mais l'invention technique et l'adéquation à une « utilité » sociale. C'est-à-dire que pour qu'il y ait apparition d'un nouvel artefact au sein d'une lignée technique, il faut qu'il y ait (1) invention par un être ou un groupe d'êtres raisonnables et créatifs et (2) un groupe social qui attribue une valeur ou une utilité à cet artefact (de nos jours, nous parlons d'une sélection par le marché). De plus, à la différence des mutations génétiques qui doivent produire des êtres immédiatement adaptés à l'environnement pour

que ces derniers puissent survivre, les inventions peuvent être conservées dans le temps malgré l'absence d'une attente ou d'un besoin correspondant.

L'invention technique, qui n'est qu'une des formes de la création humaine, s'affirme comme mise en relation d'entités qui lui préexistent. Ainsi l'invention fait système.

Les autobus tractés par des groupes hybrides électriques, inventés dans les années 1930 n'ont pas survécu alors que l'invention des groupes motopropulseurs hybrides électriques est à nouveau réévaluée mais cette fois-ci pour des véhicules particuliers. Une mémoire des inventions techniques persiste même de celles qui se soldent par un échec à la différence des mutations génétiques qui débouchent sur une impasse. Ainsi, l'invention technique d'un transporteur aérien supersonique reste dans nos mémoires malgré l'échec retentissant de Concorde. Et, selon les dirigeants d'EADS²⁴, il n'aurait pas été étranger à la réussite d'Airbus.

En ce qui concerne l'ontogenèse d'un système technique, qui sera le sujet du chapitre 5, nous précisons déjà qu'elle s'inscrit toujours dans le contexte d'une lignée de systèmes techniques. Le nouveau système technique hérite alors d'un certain nombre de traits qui lui viennent de son ascendance mais s'en écarte également par un certain nombre d'innovations soit adaptées d'autres lignées soit radicalement nouvelles. Ce qui signifie qu'un système technique nouveau n'est jamais d'une conception totalement nouvelle, mais constitue une bifurcation dans l'arbre phylogénétique auquel il appartient.

5.4. Conclusion sur l'ontologie des systèmes techniques

En résumé de ce chapitre consacré à l'ontologie des systèmes techniques, nous pensons en avoir proposé une théorie dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Elle inscrit cette catégorie de systèmes de façon cohérente dans le cadre d'une théorie générale des systèmes en tant que systèmes artificiels concrets particuliers,
- Dans ce cadre général, elle trouve une articulation satisfaisante entre les systèmes techniques et une autre catégorie importante de systèmes, les théories et les modèles d'ingénierie qui sont les systèmes abstraits au sein de corpus de connaissances et qui permettent de représenter les premiers,
- Elle définit le facteur humain comme une composante essentielle des systèmes techniques

Dans l'introduction de notre chapitre consacré à la critique de l'art (chapitre 4), nous avons souligné le fait que l'effort de définition des concepts utilisés est souvent insuffisant et que les méthodologues ne s'attardent pas vraiment sur le statut ontologique des concepts utilisés (système, modèle, propriété, exigence, fonction, modes et états, ..) alors même que la définition de ces concepts constitue la base sémantique des méthodes qu'ils promeuvent.

A contrario, nous pensons avoir donné des contenus précis à des concepts et à des relations qui sont souvent mal ou pas définis dans la littérature et sur lesquels l'ingénieur bute tôt ou tard dans sa pratique. Il s'agit en tout cas de concepts et de relations sur lesquels nous avons personnellement du faire retour de façon récurrente dans l'exercice de notre profession. Il s'agit également de concepts et de relations qui, au vu de nos échanges au sein de notre communauté, sont souvent l'objet de définitions mal assurées et ne s'inscrivant pas dans le cadre d'une théorie cohérente.

Or, nous considérons que ces approximations sont une entrave forte aux processus d'accord entre parties prenantes et, du point de vue même de la raison instrumentale, une source importante d'inefficacité.

Dans ce chapitre, nous avons clarifié les notions suivantes de:

²⁴ Déclarations à la suite du vol inaugural de l'Airbus A380.

- système et proposé une classification consistante des systèmes en systèmes naturels et artificiels, en systèmes artificiels concrets et abstraits.
- propriété et proposé une classification consistante des propriétés en propriétés formelles et matérielles, en propriétés intrinsèques et relationnelles.
- modèles dans ses relations avec les systèmes concrets,
- fonction en tant qu'effet recherché par opposition aux effets concomitants très majoritairement ignorés par les méthodologues,
- fonction par opposition à la notion de transformation,
- état et mode de fonctionnement strictement distingués.

Outre l'intérêt que présente, en tant que telle, la mise au clair de ces notions, elle nous paraît être la condition préalable pour répondre de façon satisfaisante aux problèmes posés dans la pratique par de multiples aspects de l'ingénierie comme par exemple l'ingénierie des exigences. Elle nous donne également les moyens pour aborder des questions comme la (ou plutôt les) modélisation(s) en ingénierie, ou encore comme la pertinence de l'approche de vérification et de la validation des systèmes techniques par des techniques de preuves et les essais (à propos d'un système technique, que peut-on prouver, que reste-il à tester?).

Chapitre 6

Propositions pour l'Ingénierie des Systèmes Techniques

Comme nous l'avons déjà indiqué, une conduite rationnelle en conception et en ingénierie de systèmes ne peut se réduire à des actions qui mettent en rapport les moyens « les plus appropriés » à des fins mais doit être comprise comme une conduite qui est également (1) fondée sur une base cognitive consistante et (2) qui vise par ailleurs à construire un accord entre les parties prenantes.

Nous avons fait, dans le chapitre précédent, un ensemble de propositions concernant la théorie des systèmes techniques, nous proposons maintenant un ensemble d'analyses concernant l'ingénierie des systèmes techniques.

Dans ce chapitre nous concevons le processus d'ingénierie des systèmes techniques d'une part comme un processus de synthèse des systèmes à partir d'un ensemble de constituants choisis par les concepteurs et d'autre part comme un processus collectif de décisions justifiées. C'est au travers de ce processus collectif de décisions justifiées que s'opère la synthèse nécessaire entre les différents points de vue qui doivent s'exprimer et qu'un accord entre les différentes parties prenantes doit être trouvé.

La spécificité de notre démarche tient dans la tentative, sous l'hypothèse de la rationalité limitée des acteurs pris individuellement, de dépasser les limitations de la rationalité instrumentale, en tirant parti des potentialités offertes par le groupe (les parties prenantes d'un projet d'ingénierie)

6.1. Propositions pour la conception des systèmes

Le cœur du processus d'ingénierie système est appelé conception de systèmes (System Design) dans l'EIA 632. Dans l'IEEE 1220-1998, le même périmètre est obtenu en regroupant trois processus : l'analyse des exigences, l'analyse fonctionnelle et la synthèse. La conception de systèmes EIA 632 a été décrite dans la section 3.2.2.3 tandis que l'équivalent IEEE 1220 a été présenté aux paragraphes 3.1.2.1, 3.1.2.3 et 3.1.2.5.

Nous avons justifié au paragraphe 3.4 notre préférence pour le cadre proposé par l'EIA 632, aussi ferons-nous nos propositions en nous référant plutôt à la description EIA 632. Nous présenterons nos propositions selon trois axes.

- Le noyau décisionnel du processus de conception,
- La synthèse des exigences,
- La synthèse logique et physique de la solution.

6.1.1. Le noyau décisionnel du processus de conception

Rappelons maintenant le schéma figurant le processus de conception selon l'EIA 632.

A partir de ce schéma, nous pouvons imaginer un mouvement tournant qui va de la définition des exigences applicables à un niveau N («building block» de niveau N) à la définition de la solution avec un retour sur la définition des exigences soit pour résorber les éventuels conflits soit pour passer au niveau N+1 (d'un bloc parent aux blocs enfants).

Les auteurs de ce schéma ont cependant négligé, selon nous, de représenter les moments essentiels de ce mouvement tournant, à savoir les moments de décision. Si certaines de ces décisions s'effectuent de manière routinière et sans autre forme de procès, d'autres prennent la forme de décisions explicites à l'issue de délibérations. Il serait souhaitable que les décisions essentielles, celles qui engagent le respect des exigences primordiales du système, fassent l'objet de telles délibérations explicites.

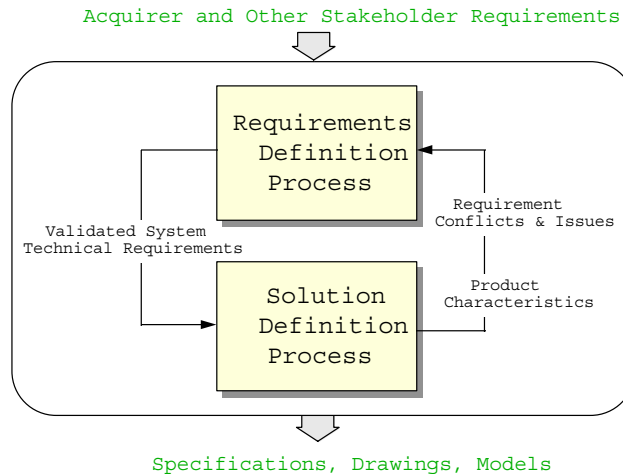


Figure 6.1. Les processus de conception de systèmes selon EIA-632

Pour cette raison, nous plaçons au cœur du processus de conception de systèmes, un processus décisionnel permettant :

- de réaliser et de justifier une **synthèse des exigences** applicable à chaque niveau de décomposition du système,
- de réaliser et de justifier une conception transformationnelle (fonctionnelle) de chaque niveau de décomposition du système,
- de réaliser et de justifier une conception physique (exprimée en termes de transformateurs ou de processeurs physiques) de chaque niveau de décomposition du système,

Il y a donc une intrication des quatre processus centraux de la conception d'un système technique, à savoir :

- la définition des exigences,
- la définition de la solution fonctionnelle,
- la définition de la solution physique,
- le processus de décision, ce dernier constituant le moteur de la synthèse du système.

Cette intrication exprime le fait que la définition des exigences, la définition de la solution fonctionnelle et la définition de la solution physique ne peuvent être conduites les unes indépendamment

des autres ou séquentiellement l'une après l'autre, mais qu'au contraire l'avancement de ces processus dépendent les uns des autres et que le processus de décision permet l'engrènement de ces différents processus de définition.

Cette position centrale du processus de décision au cœur de la conception d'un système jette un pont entre cette activité d'ingénierie de systèmes et les problèmes de décision tels qu'a pu les aborder Bernard Roy et beaucoup d'autres.

6.1.2. La synthèse des exigences

Le schéma ci-dessous illustre les différentes notions utilisées en ingénierie des exigences.

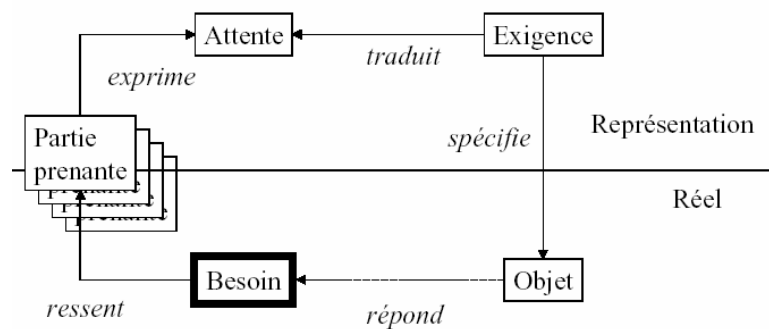


Figure 6.2. Besoin/Attente/Exigence/Objet

L'ingénierie des exigences concerne la définition et la gestion de toutes les exigences applicables à un système technique.

Les exigences concernent trois classes d'entités qu'elles mettent en relation :

- des prescripteurs,
- des prescriptions,
- des objets cibles.

La production d'une expression des exigences, réalisée dans le cadre de l'ingénierie des exigences, se justifie par trois types de raisons

- permettre le développement de systèmes techniques adaptés au besoin,
- permettre la validation des systèmes techniques,
- Permettre la maintenance des systèmes techniques en opération.

En effet, la nécessité de définir une expression des finalités d'un système technique relativement à des « besoins » s'impose dès que celui-ci est un tant soit peu compliqué. Toutefois, il convient de ne pas perdre de vue que ces besoins sont mouvants, volatiles et que l'ingénierie des exigences doit prendre ce fait en considération. Le processus d'ingénierie des exigences doit permettre de suivre l'évolution des besoins.

La validation d'un système technique requiert la définition d'un « modèle de référence » du système, la spécification des exigences du système. L'absence d'un tel modèle interdit la possibilité d'une telle validation.

La correction et la modification d'un système technique un tant soit peu compliqué, notamment s'il contient du logiciel, n'est possible que si la définition des exigences est disponible. En l'absence d'une expression de ces exigences, il n'est pas possible de déterminer si le système corrigé ou modifié continue de conserver les exigences auxquelles il est astreint (les exigences de sûreté, par exemple).

6.1.2.1. *Les prescripteurs*

On appelle prescripteur ou partie prenante (stakeholder), celui ou celle qui exprime des attentes vis-à-vis du système et qui peut légitimement²⁵ avoir de telles attentes. On peut distinguer trois catégories de parties prenantes :

- les acquéreurs du système : les acheteurs, les utilisateurs ou à défaut le marketing du fournisseur, lorsqu'il s'agit d'un système vendu sur un marché de masse, pour lequel les acheteurs ne sont pas individualisables,
- les fournisseurs de chaque phase du cycle de vie du système : les concepteurs, les fabricants, assembleurs, intégrateurs et essayeurs, le support, le service après vente,
- les tiers qui ne participent pas à la relation client/fournisseur mais qui pèsent sur celle-ci : l'Etat, les organismes de normalisation, les concurrents, les médias, les groupes de pression, etc.

Ces parties prenantes sont les **sources** d'exigences auxquelles le système technique doit apporter des réponses selon l'importance de ces exigences.

Chaque partie prenante va exprimer des attentes, le plus souvent en termes d'**aptitudes** (capability) dont doit être pourvu le système technique.

Ainsi, pour le fournisseur d'un système technique, la première propriété (dont doit être doté le système technique qu'il produit) est une aptitude socio-économique, il doit être **vendable**, c'est-à-dire qu'il doit avoir aux yeux d'un nombre suffisant d'acquéreurs potentiels une valeur d'usage suffisante pour que ceux-ci l'acquièrent.

Le premier processus à assurer en conception de systèmes n'est donc pas un processus technique mais un processus économique, celui d'une analyse d'une demande solvable manifeste ou potentielle. Pour connaître le marché, les acquéreurs potentiels, leurs attentes, les prix du marché, la position des différents concurrents, la stabilité, ou au contraire la volatilité de la demande, le concepteur/réalisateur d'un système technique devrait implanter un processus de scrutation du ou des marchés sur lesquels il positionne ses produits et systèmes. C'est généralement une des fonctions dévolues au service Marketing. A défaut d'acquéreurs identifiés, comme c'est le cas sur les marchés de masse, le marketing ou le service produit est le principal prescripteur d'exigences et une partie prenante obligatoire d'un projet de conception de systèmes.

De manière symétrique, les acquéreurs potentiels du système, s'ils sont avisés, attendent de celui-ci qui soit **acquérable, opérable, maintenable et démantelable**, c'est-à-dire que les coûts du cycle de vie du système technique lui conservent une valeur suffisante à leurs yeux (par exemple, un revenu suffisant²⁶).

6.1.2.2. *Les prescriptions*

Les parties prenantes peuvent²⁷ exprimer des attentes, formulées en termes d'aptitudes et dans des formes plus qualitatives que quantitatives. La formulation de ces aptitudes peut être non directement

²⁵ Pour nous, ces attentes doivent être fondées, c'est-à-dire que les parties prenantes qui les expriment doivent être d'une part fondés à les formuler et d'autre part aptes à les justifier.

²⁶ Dans le domaine de la défense, par exemple, une vision strictement économique est non pertinente, les acquéreurs s'intéresseront à la « valeur militaire » du système.

²⁷ Ceci est une tolérance, pas une exigence. Les parties prenantes peuvent également exprimer leurs attentes en des termes quantitatifs précis.

exploitables par les concepteurs du système et requérir un traitement préalable. Nous distinguons ces attentes (expectations) de la notion d'exigence (requirements).

L'un des objectifs de l'ingénierie des exigences est précisément de traduire les attentes en exigences bien formées.

Nous pouvons ainsi considérer qu'une exigence passe par plusieurs états ainsi définis :

- Identifiée : Une exigence est identifiée dès qu'elle est déclarée à un niveau qualitatif dans le processus d'analyse, il s'agit alors encore d'une attente.
- Spécifiée : elle est définie à un niveau quantitatif dans le processus d'analyse.
- Allouée : elle est assignée à un produit, un processus, un sous-système ou répartie sur plusieurs d'entre eux.
- Couverte : elle est satisfaite par le ou les constituants auxquels elle a été allouée.

Une exigence devrait pouvoir être rattachée à une attente exprimée par une partie prenante. En général, une attente se ramifie en plusieurs exigences. Des attentes différentes se traduisent par des exigences différentes, mais il se peut que des attentes différentes débouchent sur « la même » exigence.

Le rattachement d'exigences à des attentes participe d'un processus appelé **traçabilité** permettant de revenir des conséquents aux antécédents au sein du processus de conception.

Par ailleurs, une exigence doit pouvoir être liée à un produit, un processus, un sous-système du système ou répartie sur plusieurs d'entre eux. Cette liaison participe d'un processus appelé **allocation** permettant d'aller des antécédents aux conséquents au sein du processus de conception.

Nous appelons exigence spécifiée un triplet (**Lignée, Prescription, Cible**) où Lignée est la liste des antécédents de l'exigence, c'est-à-dire sa source (prescripteur) suivie de la liste de ses traductions successives, où Prescription est formée du triplet (**Condition, Propriété, Domaine**) tel que :

$$EX_n : C \Rightarrow \text{val}(P) = D \quad [6.1]$$

Et où Cible est l'entité du système à laquelle la prescription s'applique.

En d'autres termes :

- une exigence résulte de traductions successives d'une attente exprimée par une partie prenante, c'est sa lignée,
- une exigence est une contrainte conditionnelle imposée à une propriété du système, c'est sa prescription.
- une exigence s'applique à une entité du système qui doit posséder la propriété prescrite et respecter la contrainte appliquée à cette propriété.

Par abus de langage, nous parlerons souvent d'exigence au lieu de prescription pour nous conformer à l'usage. Dans ces cas, il ne sera pas difficile d'établir en fonction du contexte que c'est de la prescription de l'exigence dont il s'agit.

L'expression Condition précise les circonstances dans lesquelles la prescription est effective, nous l'appelons **condition d'applicabilité** de l'exigence ; l'expression Propriété se rapporte à une propriété (intrinsèque ou fonctionnelle) du système ; Domaine est un domaine de valeurs cohérent avec la propriété invoquée et que nous appelons **domaine d'acceptabilité** de l'exigence.

Par exemple :

$$EX_n : A_{\text{vide}} \Rightarrow \text{val}(M_{\text{VHL}}) = [0,9T ; 1,2T] \quad [6.2]$$

La condition d'applicabilité de l'exigence correspond à un état ou à un sous ensemble d'états du système (ou de son environnement). Ainsi la condition A_{vide} correspond à l'état où aucun occupant n'est installé dans le véhicule et où aucune charge utile ne s'y trouve. Il est également possible d'exprimer la condition d'applicabilité d'une exigence en termes de modes de fonctionnement, compte tenu de la dualité des modes et des états évoquée ci-dessus. Cette condition d'applicabilité est aussi complexe que nécessaire.

De même, le domaine d'acceptabilité peut être aussi complexe que nécessaire, comme partie du produit cartésien d'un nombre quelconque de domaines $D = \prod D_i$.

Ainsi, dans des conditions déterminées, le véhicule devra pouvoir se déplacer à sa vitesse maximum pendant une heure au moins est une exigence de durabilité exprimée de la manière suivante :

$$\text{Conditions} \Rightarrow \text{val}(V_{VHL}, \text{Durée}) = [V_{max} - \text{tol}]X[1h, ..] \quad [6.3]$$

Si E est l'espace d'états (ou l'espace des modes) d'un système S, une propriété P de S est **complètement spécifiée** si et seulement s'il existe une partition $(C_i)_{i \in I}$ de E telle que $\forall i, \exists D_i$ tel que $C_i \Rightarrow \text{val}(P|_{C_i}) = D_i$. En particulier, cette caractérisation vaut si la propriété P est un effet recherché (fonction) ou un effet indésirable d'un système S. Une fonction F du système S est complètement spécifiée si son domaine d'acceptabilité est défini pour tous les états du système.

Deux exigences sont dites **équivalentes** si elles correspondent à des prescriptions identiques, sans toutefois avoir nécessairement la même lignée. Deux prescripteurs distincts, pour des raisons qui appartiennent à chacun d'eux, peuvent aboutir à la prescription. Deux prescriptions identiques sont équivalentes.

Deux exigences sont dites **identiques** si elles sont équivalentes et si elles ont la même lignée. Elles correspondent alors à la même prescription. Il s'agit de la même exigence.

Deux exigences sont dites **non contradictoires** si elles correspondent à des prescriptions (C, P, D) et (C', P', D') telles que $P = P'$ et sur $C \cap C'$ on ait $D \cap D' \neq \emptyset$. En particulier, deux exigences équivalentes sont non contradictoires.

Deux prescriptions concernant un système technique peuvent être **composées** à l'aide d'un opérateur **de composition** \oplus opérant sur l'ensemble des prescriptions :

Si $EX_1 = (C, P, D)$ et $EX_2 = (C', P', D')$ sont deux prescriptions alors la composée $EX_1 \oplus EX_2$ est une prescription $EX_3 = (C'', P'', D'')$ telle que :

$$C'' = [C - C'] \cup [C' - C] \cup [C \cap C'], \quad [6.4]$$

$$C - C' \Rightarrow P'' = P \text{ et } D'' = D, \quad [6.5]$$

$$C' - C \Rightarrow P'' = P' \text{ et } D'' = D', \quad [6.6]$$

$$C \cap C' \Rightarrow P'' = P \wedge P' \text{ et } D'' = D \times D' \quad [6.7]$$

Deux prescriptions EX_1 et EX_2 sont en **conflit** s'il n'est pas possible de concilier le fait que $\text{val}(P|_{C \cap C'}) = D$ et que $\text{val}(P'|_{C \cap C'}) = D'$.

Il convient de distinguer cependant les conflits absolus que nous appelons **contradictions** (dans la spécification du système) et les conflits relatifs que nous appelons **incompatibilités** entre plusieurs prescriptions (pouvant être liées à des problèmes de conception).

Des prescriptions sont contradictoires si aucun système technique ne peut satisfaire simultanément ces prescriptions parce qu'elles sont logiquement ou physiquement contradictoires, elles défient les lois de l'esprit ou de la nature. Un ensemble d'exigences qui présente des contradictions est non satisfaisable et se réfère donc à un système infaisable. La résolution de telles contradictions exige une révision des exigences.

Une **incompatibilité** entre plusieurs prescriptions est un conflit qui ne peut pas être résolu pour un système donné ou une famille donnée de systèmes. La résolution de ce conflit passe par des modifications de la conception du système, des innovations, le franchissement de barrières technologiques, des évolutions économiques ou sociales.

Nous appelons **spécification** d'un système technique, l'expression du système d'exigences dont il est la cible (ou le système d'application). Une spécification ne doit pas comporter de contradictions. La conception d'un système peut entraîner des incompatibilités au sein du système des prescriptions qu'il est censé couvrir. Le règlement de ces incompatibilités peut passer (1) par la modification des spécifications du système concret, (2) par la modification de la conception du système concret, ou encore (3) des deux.

6.1.2.3. *Les objets cibles*

Nous avons défini, ci-dessus, les exigences relatives à un système technique comme étant des contraintes appliquées à certaines propriétés d'un système. Par ailleurs (5.3.3, Les systèmes techniques), nous avons défini les systèmes techniques comme des objets concrets représentables par des triplets constitués d'une composition, d'un environnement et d'une structure.

Dès lors, il est possible de construire une typologie d'exigences relative à un système technique.

Une exigence peut être formulée à propos :

- d'un composant du système, c'est-à-dire à propos d'un artefact ou d'un humain qui appartient à la composition du système,
- d'un constituant de l'environnement du système, c'est-à-dire à propos d'un système ou d'un objet qui appartient à l'environnement du système,
- d'un élément de la structure du système, c'est-à-dire à propos d'une liaison (structure statique), d'une interaction (structure dynamique) entre constituants du système et de l'environnement du système ou encore d'un processus se déroulant au sein du système.

Les exigences concernent donc des propriétés (intrinsèques ou relationnelles) assignables à trois types d'objets (artefacts, humains, objets de l'environnement), ou à leurs interactions et processus.

Une exigence intrinsèque peut concerner un artefact du système (par exemple, masse du véhicule), un humain du système ou de son environnement (par exemple, l'aptitude à la conduite du conducteur), un objet de l'environnement (par exemple, la pente de la chaussée). Une exigence relationnelle peut concerner la relation concrète artefact/artefact (par exemple, la relation Moteur - Boîte de vitesses), la relation concrète artefact/humain (par exemple l'IHM Conducteur - GMP), la relation concrète artefact/objet extérieur (par exemple, la relation Véhicule - Chaussée), la relation concrète humain/humain (par exemple, la relation Pilote - Copilote). Un dernier type d'exigence relationnelle peut concerner la relation concrète un humain du système et des objets environnants (par exemple, la relation conducteur – système de ravitaillement en carburant).

Lorsque qu'un système technique est développé, c'est nécessairement pour en modifier l'environnement en interagissant avec d'autres systèmes situés dans cet environnement (ces interactions

justifie son utilité). Ces interactions sont souvent spécifiées sous la forme d'exigences d'interface qui définissent les conditions de liaison et d'interaction entre des constituants du système à développer et des constituants des systèmes environnants.

L'expression de ce type d'exigences d'interface à partir de l'expression générale proposée $C \Rightarrow \text{val}(P) = D$ n'offre pas de difficulté particulière.

Une exigence d'interface EX_ITF se présente comme la composition d'exigences physiques EX_PHY et d'exigences relationnelles (ou fonctionnelles) EX_FONC : $\text{EX_ITF} = \text{EX_PHY} \oplus \text{EX_FONC}$. Ces exigences sont également des compositions d'exigences plus spécifiques.

Une exigence d'interface est pour nous une exigence relationnelle artefact/artefact (autrement, nommée interface interne), ou une exigence artefact/humain (autrement, nommée IHM) ou encore, une exigence artefact/objet de l'environnement (autrement, nommée interface externe) auxquelles nous proposons d'ajouter les exigences relationnelles humain/humain

Il arrive fréquemment que l'on exprime des exigences relativement à des processus que des parties prenantes doivent réaliser vis-à-vis des produits (intermédiaires ou finals) du système, comme par exemple, des exigences de méthodes de conception ou de fabrication ou vis-à-vis d'autres parties prenantes, comme, par exemple, des exigences de management. Il s'agit, pour nous, d'exigences relationnelles « humain/artefact » dans le premier cas et « humain/humain » dans le second cas.

Enfin, les exigences appliquées à un système ne sont pas exclusivement techniques (tournées vers la valeur d'usage du système), mais elles peuvent être également économiques (tournées vers la valeur d'échange du système). Les exigences de coûts, de prix, de délais apparaissent alors comme des exigences relationnelles « humain/artefact » qui viennent contraindre les relations « concepteur – artefact », « constructeur – artefact », « vendeur – acheteur », « utilisateur – artefact », etc.

6.1.2.4. Relations entre exigences

Les attentes et les exigences concernant un système technique ne se réduisent pas à une liste (ensemble amorphe) de prescriptions mais forment, elles aussi, un système, c'est-à-dire des entités (abstraites ici) en relation. Nous identifions deux sortes de relations :

- la dérivation,
- la surcharge

La **dérivation** est le mécanisme par lequel on passe soit d'une attente à une autre attente (plus précise) ou à une exigence bien formée, soit d'une exigence à une autre exigence. C'est un mécanisme divergeant (one-to-many). Une attente (resp. exigence) est dérivée en une ou plusieurs attentes ou exigences (resp. exigences).

La dérivation d'une attente ou d'une exigence résulte toujours d'un choix de conception. Ce choix de conception peut concerner un modèle de représentation du système soit le système lui-même. Il est utile de justifier ce choix de conception.

On a donc ici $C \Rightarrow \text{val}(P) = D$ est dérivée en $\{C_i \Rightarrow \text{val}(P_i) = D_i\}$

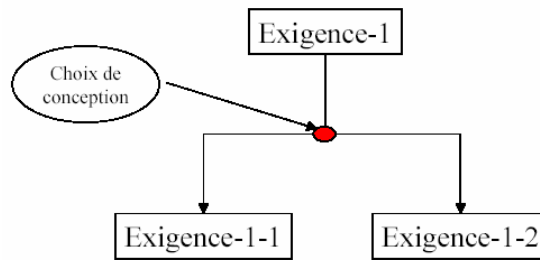


Figure 6.3. Dérivation d'une exigence

Ainsi une exigence sur la vitesse maximum d'un véhicule (dans des conditions données) peut être dérivée en une exigence sur la masse du véhicule, une exigence sur la puissance de son système propulsif et une exigence sur son SCx.

Deux exigences sont identiques si elles dérivent directement ou transitivement de la même attente émise par la même source. En revanche, deux exigences peuvent être équivalentes sans être identiques, il suffit pour cela qu'elle n'ait pas la même origine.

La **surcharge** est le résultat auquel on aboutit, lorsqu'en dérivant une exigence, une exigence dérivée se superpose à une exigence déjà existante de façon non contradictoire. C'est un événement qui introduit une convergence (many-to-one) qui à partir de points de départ distincts aboutit à une destination unique.

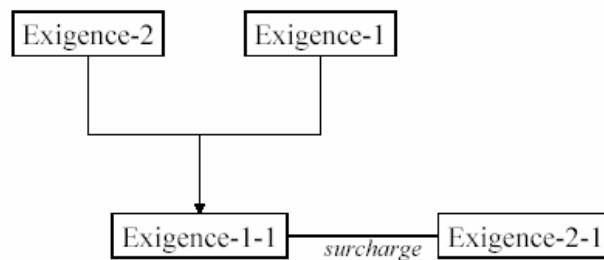


Figure 6.4. Surcharge d'une exigence

Le processus d'analyse des exigences d'un système conduit d'une part à dériver les exigences à partir des attentes formulées par un prescripteur et d'autre part à en surcharger certaines déjà existantes à partir des attentes formulées par un autre prescripteur.

Par exemple, une propriété la masse d'un système technique embarqué dans un véhicule (terrestre, aérien, ..) fait l'objet d'exigences très fortement surchargées. La modification d'une exigence surchargée a donc un impact plus important que celle d'une exigence non surchargée.

En effet, la surcharge d'une exigence dérivée à partir de deux sources distinctes a pour conséquence d'introduire un couplage entre les choix de conception dont sont issues ces dérivations.

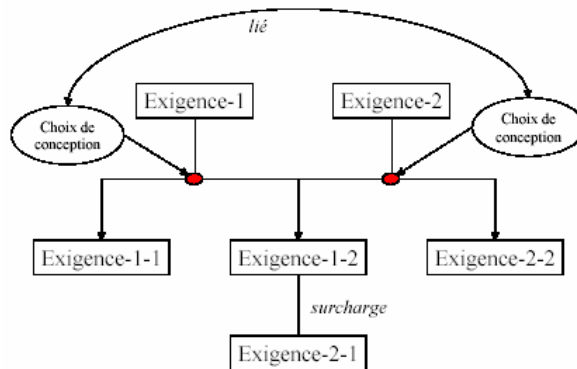


Figure 6.5. Effets de la surcharge sur la dérivation

6.1.2.5. Relations entre exigences et objet cibles

On appelle **allocation** le processus qui consiste à attribuer ou assigner une exigence à un objet concret. Une exigence (prescription) étant caractérisé par un triplet (C ,P , D), assigner cette exigence à un objet concret O signifie que lorsque C sera réalisé, l'objet concret O devra posséder la propriété P et que val(P) devra être dans le domaine de valeurs D.

Si l'objet concret O est un système, la propriété P qu'il devra posséder pourra être soit une propriété résultante, soit une propriété émergente (voir section 5.2.3 Propriétés résultantes et émergentes).

Si P est une propriété résultante alors la dérivation de l'exigence (C, P, D) correspondra à une répartition sur des constituants de O respectant la contrainte globale (val(P)=D). C'est notamment le cas pour les bilans de masse, les bilans de consommations, etc.

Ainsi pour qu'un véhicule terrestre ait une masse M (propriété résultante) il faudra que chacun de ses composants c ait lui-même une masse m_c telle que $M = \sum m_c$.

Si P est une propriété émergente alors la dérivation de l'exigence (C, P, D) correspondra à une allocation aux constituants, aux liaisons et aux interactions entre constituants de O de propriétés (distinctes de P) permettant l'émergence de P.

Pour qu'un véhicule terrestre puisse se déplacer à une vitesse V dans des conditions spécifiées, il faudra que ses constituants (GMP, roues, profil de carrosserie, ..) répondent à des exigences spécifiques (le couple fournie, le rayon, le coefficient aérodynamique, ..) liés les uns aux autres par une **équation d'ingénierie** $V = f(M, R, SCx, ..)$.

Notons que dans les deux cas, le nombre de dérivations alternatives qu'il est possible d'envisager est théoriquement infini ce qui signifie clairement que les problèmes de conception sont toujours des problèmes multivoques.

6.1.2.6. Définition et gestion des exigences.

Le schéma ci-dessous propose une représentation des différents processus associés à l'ingénierie des exigences. Ce schéma est construit à partir de la figure 6.2 Besoin/Attente/Exigence/Objet.

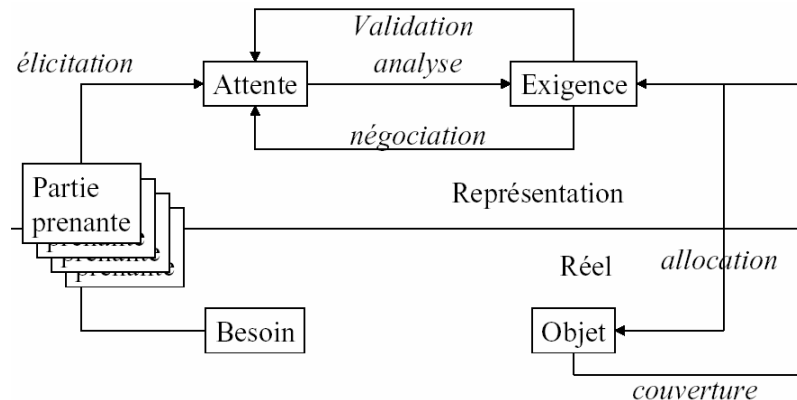


Figure 6.6. Les processus d'ingénierie des exigences

Ce schéma introduit cinq processus d'ingénierie des exigences, à savoir :

- **l'élucation** des attentes, processus qui conduit les parties prenantes à traduire en attentes un besoin ressenti,
- **l'analyse ou la dérivation des exigences**, processus qui conduit les ingénieurs à traduire en exigences applicables au système, les attentes exprimées par les parties prenantes,
- **la validation et la négociation**, processus qui consiste en la vérification que les attentes des parties prenantes ont été correctement prises en compte, en la détection éventuelle de conflits entre exigences et en la recherche de compromis à propos des exigences conflictuelles avec les parties prenantes concernées.
- **l'allocation des exigences**, processus qui consiste en l'attribution des exigences à des objets de conception plus concrets, comme une chaîne de transformations, une liaison, un processeur.
- **La couverture**, processus qui consiste à vérifier que toutes les exigences à satisfaire sont satisfaites par les différentes propriétés du système conçu.

La traçabilité est alors le processus qui consiste à enregistrer la trace des élucations d'exigences, des dérivations d'exigences, des allocations d'exigences à des objets et des couvertures réalisées pour pouvoir naviguer dans la conception et pouvoir ultérieurement en disposer en vérification, modification et maintenance.

Les standards comme l'IEEE 1220 et l'EIA 632 fournissent des listes de tâches très intéressantes à avoir en mémoire lors du déroulement de ces processus.

Cette littérature introduit trois types de grandeurs :

- Les MOE (**Measure of effectiveness**) : Métrique permettant à un utilisateur d'exprimer sa satisfaction vis-à-vis des produits réalisés.
- Les MOP (**Measure of performance**) : Mesure de performance qui fournit les exigences de conception nécessaires pour satisfaire un MOE. Il existe généralement plusieurs MOP pour satisfaire un MOE.
- Les TPM (**Technical performance measurement**) Technique permettant d'identifier, d'établir et de contrôler les paramètres techniques clés (limité aux paramètres critiques et à ceux identifiés par le client)

Il s'agit pour nous d'exigences particulières considérées comme des exigences phares en ce qui concerne les TPM et les MOE. Quant aux MOPs, ils correspondent à notre définition des exigences.

Nous appelons **référentiel des exigences** d'un système, non pas l'ensemble des exigences qui lui sont allouées mais plutôt le système des exigences qui lui est alloué. Ce système comprend non seulement les exigences prises individuellement, mais également les relations entre ces exigences (EX_1_1 est dérivée de EX_1), la lignée de chaque exigence (le prescripteur, ses justifications, la liste de ses antécédentes) les décisions de conception qui ont présidé à chaque dérivation et les justifications de ces décisions. Le référentiel des exigences d'un système s'apparente davantage à un réseau entités/rerelations qu'à une liste.

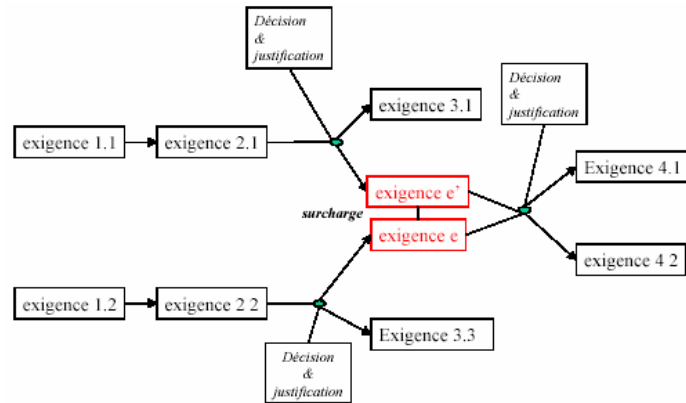


Figure 6.7. Réseau des exigences

Une première tâche de gestion de ce référentiel va consister à le maintenir en ligne par rapport aux attentes des différentes parties prenantes. On sait que ces attentes bougent parce que le monde bouge. On peut feindre de l'ignorer, en s'arc boutant sur ce qui avait initialement été convenu et dans ce cas augmenter le risque de produire un système sans valeur d'usage. On peut à l'inverse, mettre place un processus itératif de **validation** des exigences qui vise à maintenir au système son utilité.

Cette capacité à s'adapter au changement suppose qu'un cadre contractuel de **négoiation** de ce changement ait été défini. Elle exige aussi que le référentiel des exigences soit géré en **versions**.

Une deuxième tâche de gestion de ce référentiel va consister à suivre le processus d'**allocation** des exigences applicables au système à des entités du système (sous-systèmes, entités de l'environnement ou de la structure statique ou dynamique du système). Ce processus d'allocation se déroule durant la conception logique et physique du système.

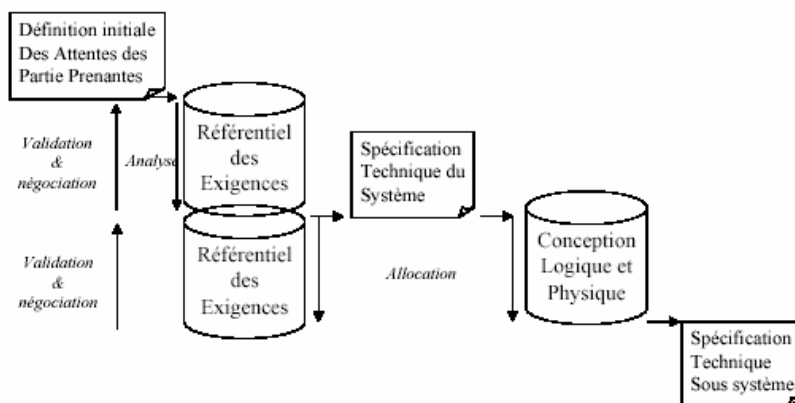


Figure 6.8. Allocation des exigences sur les entités d'un building block

Une troisième tâche de gestion de ce référentiel va consister à s'assurer que toutes les exigences applicables au système ont été effectivement été **couvertes** par des entités du système et que cette couverture est complète (i.e. dans tous les états et pour tous les modes de fonctionnement).

Une quatrième tâche de gestion de ce référentiel va consister à mesurer l'impact d'une modification d'une exigence (imposée par exemple par un conflit entre exigences) sur le réseau des exigences et sur les choix de conception antérieurs.

Les descriptions qui précèdent soulignent à quel point le processus d'ingénierie des exigences est un processus collectif entre parties prenantes, qu'il impose à ceux-ci de **négoçier** et de trouver des terrains **d'entente**. Les seules limitations apportées à la recherche d'accord étant celles qui leur imposent de rester dans le **vrai** (les systèmes sont soumis aux lois physiques qu'ils ne sauraient transgresser), et dans l'**efficace** (le processus doit rester économiquement acceptable). Notre section 6.2.5 concerne directement ce point.

Les **spécifications** qu'ils s'agissent de spécifications système, sous systèmes ou d'interfaces sont des produits en sortie du processus d'ingénierie et constituent des représentations externes (éditables sous la forme papier et lisibles) du référentiel des exigences d'un système.

6.1.3. Les synthèses fonctionnelle et physique

Rappelons tout d'abord que les standards divisent généralement la conception d'un système en deux processus principaux si l'on met de côté les aspects de vérification et de validation (traités de façon transverse aux autres processus).

Pour l'IEEE 1220, il s'agit de :

- l'analyse fonctionnelle (voire partie I, section 3.1.2.3),
- la synthèse (voire partie I, section 3.1.2.5)

Pour l'EIA 632, il s'agit de :

- la conception de solution logique ([EIA 632], section 4.3.2, page 23 et table C.17, page 87)
- la conception de solution physique ([EIA 632], section 4.3.2, page 24 et table C.18, page 89)

Pour l'ISO/IEC 15288 il s'agit de :

- la conception de l'architecture logique ([ISO 15288], section 6.2.2.4.2, page 24)
- la conception de l'architecture physique ([ISO 15288], section 6.2.2.4.3, page 25)

Notons également que la formulation « analyse fonctionnelle » encore utilisée dans IEEE 1220 disparaît au profit de la formulation « « conception de la solution (resp l'architecture) logique » dans l'EAI 632 (resp. ISO 15288).

Jean-Pierre Meinadier indique ([MEI 98], chapitre 8, page 230) que le processus d'analyse fonctionnelle des systèmes comprend deux phases, une phase d'analyse fonctionnelle proprement dite (pendant laquelle les modules fonctionnels du système sont identifiés) et dont le résultat est une arborescence fonctionnelle du système et une phase de conception fonctionnelle (pendant laquelle les modules fonctionnels sont organisés en réseau) et dont le résultat est une architecture fonctionnelle du système. Cette présentation ne nous paraît pas résoudre la question de façon satisfaisante compte tenu des critiques que nous avons formulées à propos des arbres fonctionnels (voir 4.1.2, Principes de décomposition : arborescences fonctionnelles).

Notre position est la suivante :

- Depuis l'origine du standard MIL-STD-499 en 1969, l'expression « analyse fonctionnelle » est une formulation consacrée notamment pour déterminer les « sous fonctions » d'une « fonction ». De manière équivalente, des standards européens [EN-1325] désignent comme « analyse fonctionnelle » l'activité qui consiste à décomposer une « fonction de service » en une séquence de « fonctions techniques ». Dans le même temps, les entreprises se sont efforcées d'assimiler ce jargon. Il existe donc un héritage impossible à ignorer.
- La formulation « analyse fonctionnelle », parfois complétée par l'adjectif « interne », nous paraît être une expression malheureuse et inadéquate pour désigner le choix des chaînes de transformation et leurs regroupements en une architecture fonctionnelle. Le terme « analyse » est donc, selon nous, impropre pour désigner les activités décrites dans l'IEEE 1220 sous la rubrique « functional analysis » ([IEEE 1220], pages 42-44). Il serait donc souhaitable de parler de « conception fonctionnelle » ou de « conception logique » plutôt que d'analyse.

6.1.3.1. Actes de Conception

Concevoir un système, c'est déterminer, à partir d'une spécification système (système des exigences applicables) de celui-ci, un ensemble suffisant de propriétés de ses produits finaux et de ses produits de support qui autorise la mise en production d'artefacts (produisant les effets attendus dans la définition opérationnelle).

La détermination de propriétés relationnelles (ou fonctionnelles) des constituants du système relève de la conception fonctionnelle tandis que la détermination de propriétés intrinsèques (ou physiques) des constituants du système relève de la conception physique.

Nous appelons acte de conception, un acte (routinier ou volontaire) consistant à déterminer un groupe de propriétés d'un système. Un système se concrétise par actes de conceptions successifs. Chacun de ces actes de conception peut s'effectuer sans délibération préalable, c'est le cas des actes routiniers, fondés sur l'habitude et l'expérience. C'est aussi le cas des actes irréfléchis.

A l'inverse, les actes de conception peuvent résulter d'un processus de délibération au cours duquel le ou les concepteurs évaluent les conséquences de l'acte envisagé, recherchent la possibilité d'actes alternatifs, les avantages comparés des uns par rapport des autres avant d'arrêter une décision. Il s'agit de processus que nous décrirons plus longuement dans la section 6.2.5.

Selon nous, la conception d'un système ne met en œuvre qu'un nombre limité d'actes de conception qui concernent :

- La définition des modes de fonctionnements,
- La définition des chaînes de transformations,
- La définition de l'architecture fonctionnelle,
- La définition de l'architecture physique,
- La définition physique des processeurs.

6.1.3.1.1. Concevoir les modes de fonctionnement

Nous avons défini, dans la section 5.3.6.1, les modes de fonctionnement comme des regroupements temporels d'effets recherchés (i.e. de fonctions). Autrement dit, un mode de fonctionnement est une période du cycle de fonctionnement d'un système technique caractérisé par l'ensemble des fonctions actives ou activables pendant cette période, $M = \{\text{Fonctions activables pendant une période } P\}$

Deux modes de fonctionnement M1 et M2 distincts se distinguent par le fait qu'au moins une fonction est active dans un mode alors qu'elle est inhibée dans l'autre. Ceci n'interdit pas qu'une fonction puisse appartenir à deux modes distincts. Les modes ne constituent pas une partition (au sens strict) des fonctions du système.

Un des premiers actes de conception peut donc consister en la définition des modes de fonctionnement à partir des exigences de la spécification du système.

Il s'agit alors de scinder le cycle de fonctionnement du système en autant de modes (périodes) de fonctionnement que nécessaire. Chaque mode se distingue des autres modes par le fait qu'il a des objectifs distincts, qu'il engage des fonctions qu'on ne retrouve pas dans les autres modes ou qu'il mobilise éventuellement des ressources différentes de celles engagées dans les autres modes.

Ainsi pour un véhicule terrestre, on peut être conduit à concevoir deux grands modes de fonctionnement. Le mode Arrêt pendant lequel des opérations de ravitaillement, de maintenance sont possibles et le mode Marche pendant lequel on attend du véhicule d'autres prestations que celles du mode Arrêt.

La représentation des Statecharts, conçue par David Harel dans [HAR 98] nous paraît adaptée à la représentation des modes de fonctionnement d'un système technique. Il faut cependant signaler deux glissements sémantiques que nous leur faisons subir :

- Il ne s'agit pas ici de diagrammes d'états (au contraire de ce qu'avait imaginé Harel) mais de diagrammes de modes,
- Nous ne conservons pas l'hypothèse synchrone des Statecharts, à savoir que les transitions entre états (ici entre modes) ne sont pas instantanées.

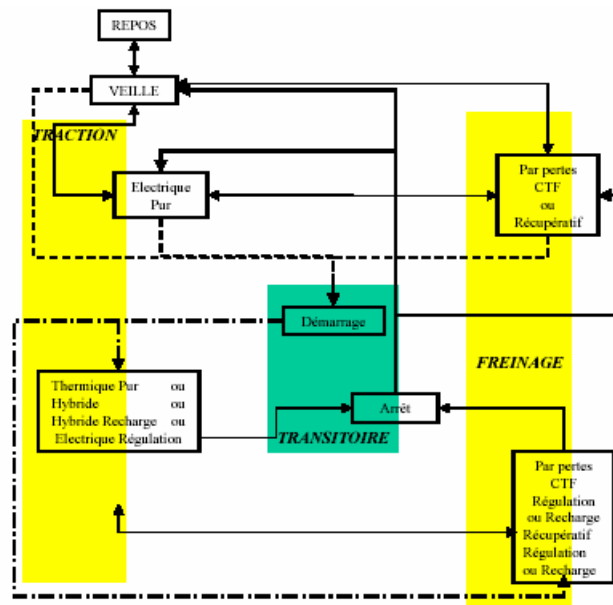


Figure 6.9. Modes de fonctionnement d'une chaîne de traction hybride

En pratique la représentation des Statecharts peut valoir aussi bien pour les modes que pour les états comme le montre le schéma ci-dessous :

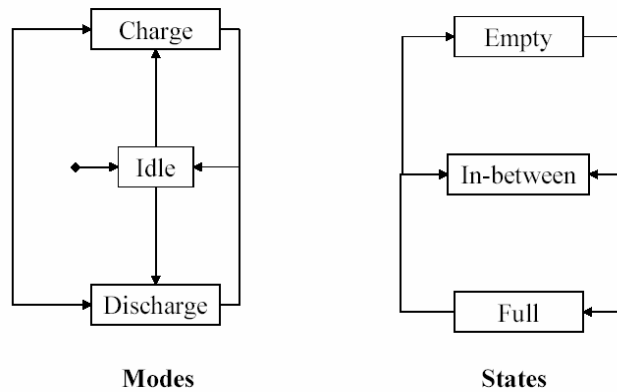


Figure 6.10. Modes de fonctionnement versus Etats de fonctionnement

La partie gauche du schéma représente les modes de fonctionnement (Charge, Décharge et Oisif) d'une batterie tandis que la partie droite représente ses états de fonctionnement (Pleine, Vide et Entre-deux). Il existe des relations de compatibilité entre les modes et les états.

6.1.3.1.2. Concevoir les chaînes de transformations

La production d'un effet recherché, tout comme la suppression ou l'atténuation d'un effet indésirable, nécessite la mise en place de :

- (a) **flux de matière, d'énergie ou d'information** (MEI) et
- (b) **chaînes de transformations** (généralement synchronisées) de ces flux capables soit de produire l'effet recherché, soit de prévenir l'effet indésirable.

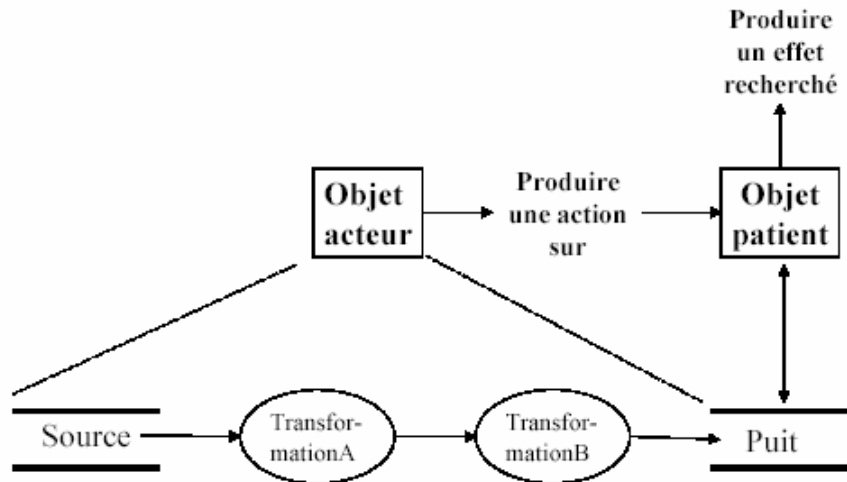


Figure 6.11. Mise en place d'une chaîne de transformations pour produire un effet recherché

Dans le cas d'un effet recherché, cette chaîne de transformations va, à partir d'une **source** de MEI, transformer un flux de manière à produire au plus près l'effet recherché. Le système auquel est appliqué l'effet recherché apparaît alors comme un **puits** dans lequel vient s'accumuler ou se dissiper matière, énergie et/ou information.

La mise en place d'un flux et d'une chaîne de transformations de ce flux pour produire un effet recherché va engendrer un ensemble d'effets concomitants. Ces effets concomitants sont spécifiques de la chaîne de transformations retenue.

Ainsi pour assurer le déplacement (effet recherché) d'un véhicule terrestre, il suffit (condition suffisante mais non nécessaire) de doter ce véhicule d'une chaîne de transformations thermodynamique convertissant l'énergie chimique d'un carburant (source) en énergie cinétique communiqué au véhicule (puits). Ce faisant, la combustion du carburant va produire un effet concomitant (production de gaz carbonique CO₂), qui dans les conditions actuelles est un effet indésirable (gaz à effet de serre).

Dans le cas du traitement d'un effet indésirable, plusieurs stratégies sont envisageables.

- La première consiste en la suppression de l'effet indésirable lui-même. Cet effet indésirable est généralement un effet concomitant d'un effet recherché. Dès lors, une stratégie radicale pour supprimer cet effet indésirable est de remplacer la chaîne de transformations. Ainsi en équipant un véhicule terrestre d'une chaîne de transformations électrodynamique, en remplacement d'une chaîne de transformations thermodynamique, destinée à la propulsion du véhicule on supprime radicalement²⁸ l'effet indésirable incriminé dans le réchauffement climatique.
- La deuxième consiste en l'atténuation de la cause de l'effet indésirable. Cette réduction s'obtient en améliorant les performances de la chaîne de transformations à la fois cause de l'effet recherché mais également de l'effet indésirable
- La troisième consiste en l'atténuation des conséquences de l'action indésirable. Cette réduction s'obtient en interposant entre le producteur de l'action indésirable et le récepteur, une chaîne de transformations qui va atténuer l'action de la source sur le récepteur en déroutant vers un autre récepteur une part de l'action indésirable.

Les quatre entités qui constituent une chaîne de transformations sont donc :

- (a) **les sources** de matière, d'énergie ou d'informations,
- (b) **les flux**.
- (c) **les transformations**
- (d) **les puits** de matière, d'énergie ou d'informations.

Les sources et les puits sont des constituants de la composition fonctionnelle du système ou de son environnement dans lesquels la chaîne de transformations prélève matière, énergie ou informations et auxquels la chaîne de transformations transmet matière, énergie ou informations transformées.

Les flux, au même titre que les autres composants de la chaîne, sont des constituants de la composition fonctionnelle du système. Les types de flux sont bien connus, il peut s'agir de flux de matière, d'énergie et d'informations. Toutefois, ces flux ne sont pas exclusifs les uns des autres, un flux pouvant être tout à la fois un flux de matière, d'énergie et d'informations. Ainsi un flux de carburant est simultanément un flux de matière, d'énergie et d'information (il y a du carburant).

De même les types de transformations sont bien connus. Une transformation peut s'effectuer par rapport à l'espace (transport), par rapport au temps (comme dans un stockage) et par rapport à la forme. Ainsi la combustion d'une charge combustible confinée dans une chambre s'effectue dans le temps (durée de combustion) et entraîne un changement de forme, ici la composition chimique de la charge.

Le **dimensionnement fonctionnel** du système, relève de la conception des chaînes de transformations même s'il ne peut être complètement accompli sans caractérisation physique du système. Le dimensionnement fonctionnel concerne les matières, les énergies et les informations, véhiculés par les

²⁸ Sauf si l'énergie électrique utilisée a également une origine thermique (centrales thermiques alimentant le réseau électrique), dans ce cas on ne fait que déplacer le problème.

flux, les quantités (moyennes et maximales) de ces matières ou de ces énergies et informations, fournies en sortie des sources et des transformations, leurs débits et leurs puissances.

6.1.3.1.3. Intégrer les chaînes de transformations

Le troisième type d'activité de conception consiste à intégrer les différentes chaînes de transformations définies précédemment. Intégrer signifie faire en sorte qu'elles tiennent ensemble. Nous appelons **architecture fonctionnelle** le résultat de cette intégration des chaînes de transformations en un tout cohérent à défaut d'être complet.

Les modes de fonctionnement constituent le premier facteur d'intégration des différentes chaînes de transformation. La commutation d'un mode vers un autre mode a en général pour effet d'inhiber une chaîne de transformations particulière et d'en activer une autre. Il en est ainsi du passage du mode Traction en mode Freinage dans le cas d'un groupe moto propulseur. Le relâchement de la pédale d'accélérateur est la cause déclenchante d'une commutation de modes et d'un changement de chaîne de transformations.

Les autres facteurs d'intégration des chaînes de transformations sont les sources et les puits.

Lorsque deux chaînes de transformations ont la même source, le flux qui part de cette source et emprunte ces deux chaînes de transformations rencontre en un point de ces deux chaînes une **divergence** à partir de laquelle les flux se séparent. Les deux chaînes de transformations comportent donc une partie commune (éventuellement réduite à zéro), un point de divergence et des parties distinctes en aval du point de divergence.

De façon symétrique, lorsque deux chaînes de transformations ont le même puits, le flux qui aboutit de ce puits et emprunte ces deux chaînes de transformations rencontre en un point de ces deux chaînes une **convergence** à partir de laquelle les flux se mêlent. Les deux chaînes de transformations comportent donc des parties distinctes en amont d'un point de convergence et une partie commune en aval.

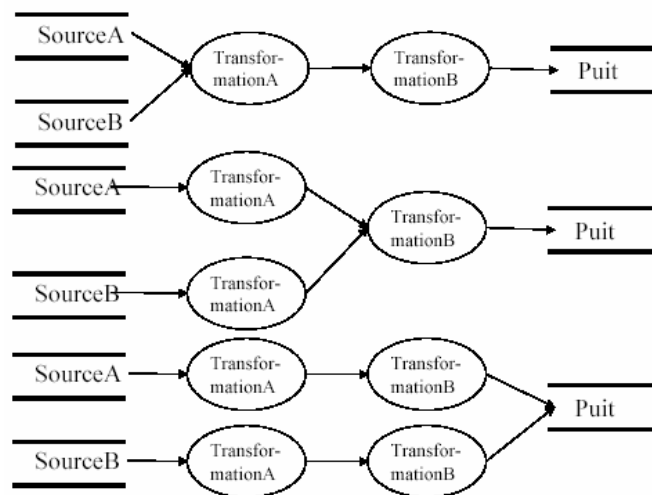


Figure 6.12. Positionnement d'une convergence

Le positionnement de ces points de convergence et de divergence au sein des chaînes de transformations qui les portent constitue des choix majeurs de conception.

L'intégration fonctionnelle conduit naturellement à des **re-dimensionnements fonctionnels** de certaines sources, transformations, flux et/ou puits du système.

6.1.3.1.4. Concevoir une architecture physique

Le quatrième type d'activité de conception consiste en la conception d'une architecture physique décrivant le système en termes d'une part, de processeurs physiques capables de réaliser les transformations qui participent à l'architecture fonctionnelle, et d'autre part, des liaisons physiques capables conduire les interactions recherchées entre les processeurs et l'environnement du système.

Les liaisons physiques (mécaniques, électriques, ..) permettent de propager ou d'inhiber la propagation des flux de matière, d'énergie et d'informations entre les différents processeurs au sein du système puis dans son environnement et ainsi d'assurer l'ensemble des fonctions du système.

L'architecture physique peut être dans un premier temps sommaire (schéma de principe) pour être dans un second temps détaillé, concrétisé.

Le schéma ci-dessous représente le schéma de principe de l'architecture physique d'un groupe moto propulseur. Il illustre la façon dont un ensemble de processeurs physiques sont liés les uns aux autres pour concrétiser l'architecture fonctionnelle d'un système de ce type.

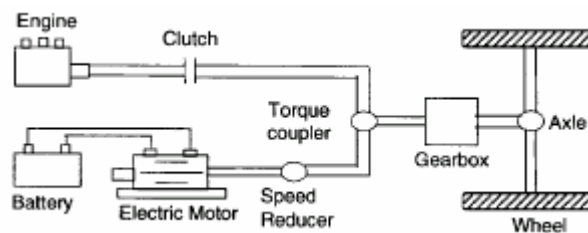


Figure 6.13. Schéma de principe d'une architecture physique.

Un tel schéma de principe d'une architecture physique représente un pas de plus dans le processus de concrétisation de la définition d'un système. Toutefois, ce processus de concrétisation n'est que très partiel : de nombreux détails ne sont pas évoqués, aucune caractéristique matérielle et de dimensionnement n'est encore fixée. Ce sera l'objet du dernier type d'activité de conception.

L'allocation est la relation qui permet de mettre en correspondance la conception fonctionnelle et la conception physique du système. L'allocation est une fonction surjective (au sens mathématique). Toute transformation et toute liaison fonctionnelle doit avoir une image dans la conception physique.

Les quatre entités qui constituent une architecture physique sont :

- (a) **les sources** physiques,
- (b) **les média** (réseaux, bus de données, circuits, tuyauteries, ..) qui portent les flux des chaînes de transformations,
- (c) **les processeurs** qui réalisent les transformations des chaînes de transformations (processeurs mécaniques, électriques, électroniques, etc.)
- (d) **les puits** physiques.

Le **dimensionnement physique** du système, en termes de caractéristiques physiques externes (dimensions géométriques, formes, masses, inerties) des constituants relève de la conception de l'architecture physique du système. Cette conception inclut la prise en compte des contraintes d'installation, le placement géographique des constituants et le routage des liaisons entre ceux-ci.

6.1.3.1.5. Concevoir des processeurs physiques

Le cinquième type d'activité de conception consiste en la sélection des processeurs physiques capables de réaliser les transformations qui participent à l'architecture fonctionnelle.

Cette sélection comprend :

- un examen des schémas de principe sur lesquels reposent ces processeurs,
- un examen des performances des processeurs et des technologies disponibles,
- un ensemble de **dimensionnements**, c'est-à-dire la détermination des performances des propriétés fonctionnelles (rendement) et intrinsèques (choix des matériaux, dimensions métriques, forme, masse, inerties, jeux, raideurs, intensité, tension, impédance, ..) de chacun des processeurs,
- un examen des conditions d'opération et d'implantation de ces processeurs,
- un examen des ressources requises par ces processeurs,
- un examen des effets indésirables que ces processeurs engendrent.

6.1.3.2. Des processus entrelacés

La détermination de propriétés relationnelles relève de la conception fonctionnelle tandis que détermination de propriétés intrinsèques relève de la conception physique.

Ces activités de conception fonctionnelle et de conception physique sont souvent présentées comme des activités séparées tant sur le plan conceptuel (les activités d'analyse et de conception ne sont pas de même nature) que sur le plan temporel (les activités d'analyse doivent être achevées avant d'entreprendre la conception).

S'il est exact que les activités de conception fonctionnelle et de conception physique sont logiquement séparées (en conception fonctionnelle, on identifie et on dimensionne des transformations tandis qu'en conception physique on franchit des degrés supplémentaires de concrétisation en dimensionnant et en recherchant des processeurs physiques), elles sont en revanche dans le temps et dans le processus fortement entrelacés.

Il est peu réaliste de vouloir conduire de bout en bout de conception fonctionnelle d'un système en s'interdisant toute référence aux procédés envisagés, à tout choix de conception. Cette posture conduit à stériliser le produit de cette activité en un ensemble de "fonctions" générales et sans caractère opératoire.

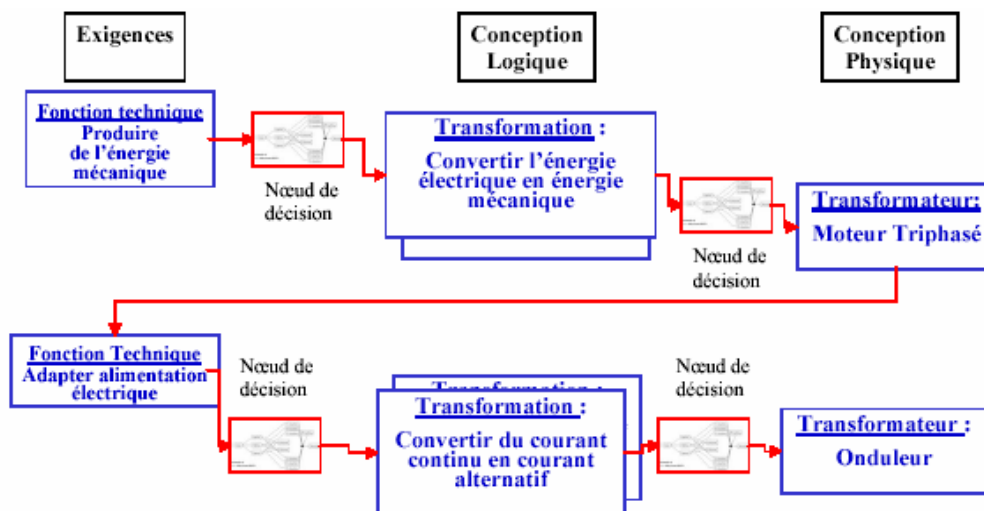


Figure 6.14. Des processus entrelacés.

Au contraire de cette vision séparée, nous adoptons d'une part la notion de « building blocks » proposé par le standard EIA 632 et d'autre part nous considérons que la conception de chaque «building block» comprend nécessairement la concomitance des trois processus suivants :

- Ingénierie des exigences du «building block»,
- Conception logique (ou fonctionnelle) du «building block»,
- Conception physique du «building block».

La réponse à une exigence fonctionnelle prend dans un premier temps la forme de chaîne de transformations puis, dans un deuxième temps, celle d'une chaîne de processeurs qui à leur tour engendrent de nouvelles exigences. A ces nouvelles exigences (qui résultent de l'introduction de processeurs) vont correspondre de nouvelles chaînes de transformations puis de nouveaux processeurs et ainsi de suite.

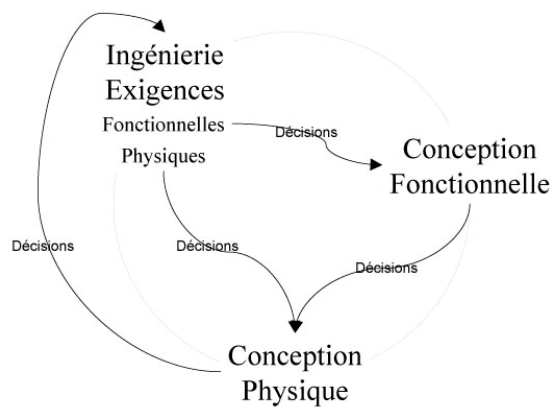


Figure 6.15. Interactions entre processus de conception

Cet engendrement de nouvelles exigences est lié d'une part à la dépendance des processeurs vis-à-vis de leurs environnements (en matière, en énergie et en information) et d'autre part au caractère imparfait des processeurs réels (voir 4.1.3, Effets recherchés et effets concomitants).

6.1.3.3. Conception routinière et conceptions innovantes

L'innovation est considérée, depuis Joseph Schumpeter, au moins, [SCH 11], comme le processus par lequel des inventions, qui appartiennent au domaine technique, s'insinuent dans la vie économique pour diffuser dans des sphères plus ou moins larges de la société. Elle est le mécanisme par lequel les conditions matérielles d'existence des sociétés contemporaines évoluent. L'innovation est considérée comme le moteur de la croissance et peut-être aussi de la prospérité.

L'innovation est considérée, à un niveau micro-économique, comme une condition de la survie et de la pérennité de l'entreprise dans un univers dominé par ce que Schumpeter nommait la « *destruction créatrice* ». Cette destruction créatrice « *révolutionne incessamment de l'intérieur la structure économique, en détruisant continuellement ses éléments vieillissants et en créant continuellement des éléments neufs* » et condamne les entreprises les moins innovantes à la disparition dans un renouvellement incessant des acteurs économiques [SCH 42].

D'un point de vue économique, les concepteurs et constructeurs de systèmes techniques sont donc condamnés à l'innovation pour faire face, sur leurs marchés, à une demande qui change et à l'offre de leurs concurrents qui se renouvelle.

Dans la section 5.3.7, nous avons évoqué le mode de formation des systèmes techniques. Ces derniers n'émergent jamais de nulle part car ils s'inscrivent d'une part dans des lignées de systèmes déjà existants et d'autre part dans des corpus de connaissances relatifs à ces systèmes mais également à d'autres systèmes. Chaque système technique qui parvient à s'inscrire dans un marché, se différencie des autres systèmes de la même lignée par les services nouveaux qu'il rend à ses acquéreurs (innovation de produit) et à ses producteurs (innovation de processus).

Il n'existe donc pas de systèmes absolument nouveaux, en revanche il existe des systèmes techniques plus ou moins innovants par l'avantage concurrentiel ou la rente de monopole qu'ils procurent à leurs constructeurs et par l'impact qu'ils ont sur la société. Les constructeurs se doivent donc de mettre en place une politique d'innovation caractérisée par :

- Une politique produit,
- Des projets d'innovation,
- Un processus de conception innovant.

Dans ce travail nous ne nous intéressons qu'au troisième terme de cette politique.

Au contraire d'un processus de conception routinier, basé essentiellement sur l'habitude et l'expérience et qui consiste à reconduire de façon quasi-automatique les solutions éprouvées, un processus de conception innovant pose l'amélioration des performances, des délais et des coûts comme un objectif prioritaire de toute conception de système et donc implique une démarche systématique pour atteindre cet objectif. C'est une démarche systématique de cette nature que nous proposons dans la section 6.2 de notre travail et intitulée « La prudence en ingénierie ».

6.2. La prudence en ingénierie

Le terme de '*prudence*' ne doit pas être pris ici dans son sens ordinaire. Nous l'employons, au contraire, dans un sens qui trouve en partie son origine chez Aristote.

Selon Pierre Aubenque [AUB 62], pour Aristote, le domaine du **contingent** concerne ce qui peut être ou ne pas être, de ce qui peut être autrement qu'il est, tandis que le domaine du **nécessaire** concerne ce qui ne peut être autrement qu'il est.

Le domaine de la **connaissance** est celui du nécessaire tandis que le domaine de la **production** et de l'**action** est celui du contingent.

Pour Aristote, « *agir et produire, c'est (...) s'insérer dans l'ordre du monde pour le modifier ; c'est donc supposer que celui-ci (...) comporte un certain jeu, une certaine indétermination, un certain inachèvement* ». Si la disposition à connaître accompagnée de règle s'appelle **science**, la disposition à produire accompagnée de règle s'appelle **art** (*techné*) tandis que la disposition à agir accompagnée de règle s'appelle **prudence** (*phronesis*²⁹).

Dans ce contexte, ce qui est généralement présenté comme la démarche scientifique peut-il constituer la règle permettant aux acteurs humains d'agir efficacement ? Si le faire de l'ingénieur est un faire accompagné de règle, cette règle est-elle la démarche scientifique ? Ou alors faut-il aller chercher des ressources complémentaires à cette démarche ?

²⁹ Le mot '*phronesis*' (φρονησις) est le terme grec utilisé dans l'antiquité pour désigner des notions aussi variées que le savoir scientifique, la sagesse, la prévoyance ou la prudence. Chez Aristote aussi, elle variera pour converger vers la définition suivante : la prudence est une disposition à agir accompagnée de règle dans un univers marqué par la contingence (dans le livre VI de l'Éthique à Nicomaque).

Ainsi l'art et la prudence ne peuvent être de simples mises en œuvre de la science et de la démarche scientifique pour deux types de raisons :

- La science vise la connaissance et non la production ou l'action,
- La science s'inscrit dans le domaine du nécessaire et non celui du contingent.

Si nous présentons les étapes de la démarche scientifique (ci-dessous) nous voyons bien que ses buts et ses problématiques ne s'accordent pas avec ceux de la production ou de l'action, même si elles peuvent partager son univers de discours et certaines de ses méthodes.

- L'observation,
- La formulation d'hypothèses, et élaboration d'une théorie,
- La vérification expérimentale,
- La communication des résultats

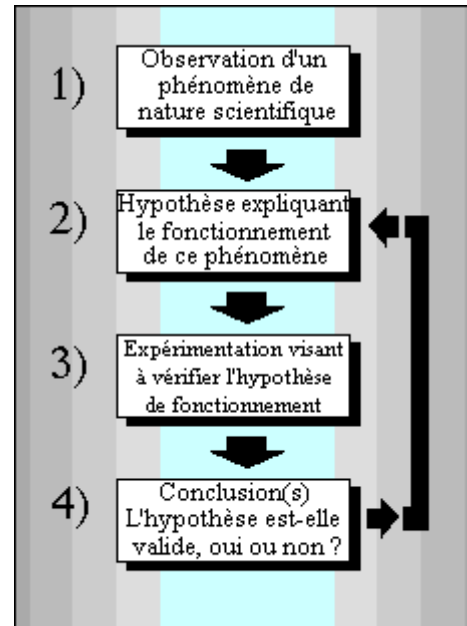


Figure 6.16. Les étapes de la méthode scientifique

Une règle, autre que la démarche scientifique, en prise avec le particulier (et non le général), avec le faire et non le connaître, avec le contingent (et non le nécessaire), doit être promue dans le domaine de la production et de l'action. Nous appelons cette règle phronesis ou **prudence**³⁰.

Dans cette section, nous allons développer les thèmes suivants :

A la section 6.2.1, nous rappelons le contexte dans lequel se déroule, selon nous, l'activité d'ingénierie et qui pèse sur celle-ci de façon déterminante. Ce contexte est pour nous celui de la **contingence** qui s'oppose au déterminisme et celui de la **rationalité limitée** qui s'oppose à une rationalité omnisciente et omnipotente.

A la section 6.2.2, nous présenterons l'ingénierie des systèmes techniques comme **un processus de concrétisation** des systèmes à produire, de ses systèmes de production, de maintien en condition opérationnelle, et de démantèlement.

Dans la section 6.2.3, nous soutenons la thèse selon laquelle l'ingénierie des systèmes techniques est principalement **un processus de synthèse** de modèles partiels en une représentation plus complète du système à produire, de ses systèmes de production, de maintien en condition opérationnelle, et de démantèlement.

³⁰ même si certains peuvent considérer qu'il s'agit d'un abus de langage, l'art étant à la production ce que la prudence est à l'action.

Dans la section 6.2.4, nous soutenons la thèse selon laquelle l'ingénierie des systèmes techniques est également **un processus d'accord** entre différentes parties prenantes sur les différentes caractéristiques du système produire, de ses systèmes de production, de maintien en condition opérationnelle, et de démantèlement.

Dans la section 6.2.5, nous présenterons l'ingénierie des systèmes techniques comme **un processus collectif de décisions justifiées**.

6.2.1. *L'action technique et la contingence*

L'activité scientifique se propose de « dévoiler le réel » en mettant en évidence les mécanismes qui font qu'il est tel qu'il est. A la différence de l'activité scientifique, l'ingénierie se propose de « transformer » le réel ou de le « compléter » et se situe par conséquent entièrement dans le domaine de production (transformation de choses) et de l'action sur les personnes.

Au sein de l'activité technique, il ne s'agit pas de comprendre ce qui existe déjà (on peut se contenter de modèles « boîte noire »), mais de faire être ce qui n'existe pas encore. De plus, les artefacts résultants de cette activité technique pourraient être différents de ce qu'ils seront. La forme concrète prise par ces artefacts n'est que partiellement déterminée par les lois de la nature et les attentes auxquelles ils sont censés répondre. La fantaisie, le hasard et l'arbitraire viennent compléter cette forme.

Toutefois, le faire de l'ingénieur se veut réfléchi, raisonné et efficace. Il s'agit d'un faire accompagné de règle.

Toutes ces actions visent à chaque fois un but spécifique, un effet attendu. Rien ne permet cependant d'affirmer que, dans chacune des circonstances du faire, le but visé sera atteint. L'expérience fournit à cet égard des contre-exemples innombrables. L'expérience fournit inversement une multitude d'exemples d'actions qui ont atteint le but visé. On désigne par le terme de '*contingence*' la cause de cette incertitude quant au résultat de l'action. Le terme '*contingent*' s'oppose donc au terme '*nécessaire*'.

6.2.2. *L'ingénierie comme processus de concrétisation des systèmes*

Passer de l'attente supposée d'un marché anonyme comme celui de l'automobile à un véhicule commercialisé, c'est effectuer un cheminement, à partir d'une intuition initiale relativement informelle, qui dans les cas heureux, conduira à un objet concret disponible sur le marché en quantité suffisante pour répondre aux attentes réelles du marché.

Passer de l'attente exprimée par un client identifié à un objet concret livré au client consiste également en ce cheminement mais accompli pour partie par le client et pour l'autre partie par le fournisseur.

Ce cheminement, que nous désignons par l'expression de **processus de concrétisation**, peut être défini comme le passage progressif d'un objet très faiblement déterminé à une détermination « complète » de l'objet concret que les exploitants vont utiliser ainsi que de l'ensemble des systèmes qui vont permettre de le produire, de le distribuer, de vendre, de le maintenir et enfin de le recycler.

La figure ci-dessous propose une représentation figurative de ce processus de concrétisation à propos de l'objet « Véhicule Hybride Parallèle ».

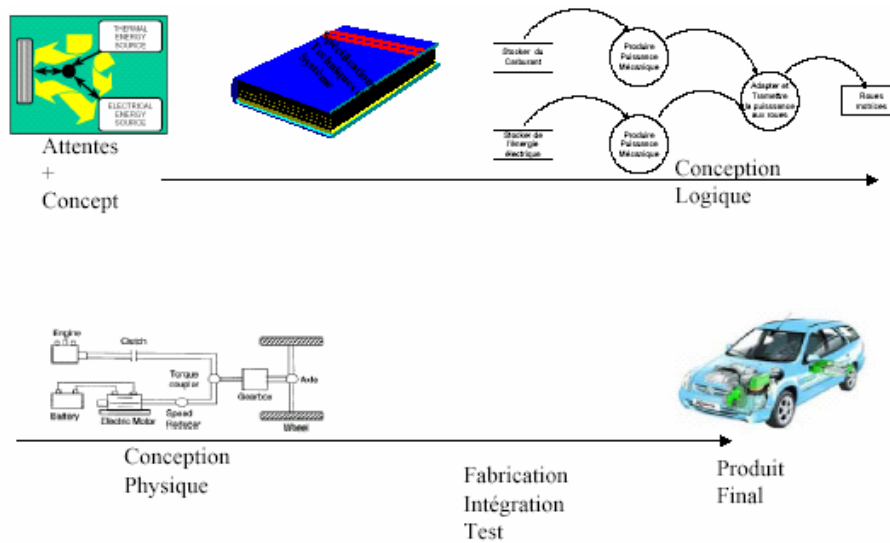


Figure 6.17. Représentation figurative d'un processus de concrétisation

Le processus de concrétisation part d'une représentation assez lâche $S_0(t_0)$ de l'objet concret qui devra être atteint. A titre d'exemple, voici des spécifications opérationnelles initiales pour un véhicule hybride (les chiffres sont fantaisistes) :

- des performances générales équivalentes à celles d'une voiture particulière conventionnelle (par exemple, des performances supérieures à 95% des performances d'un véhicule conventionnel de référence),
- des surcoûts d'acquisition et de maintenance non dissuasifs (par exemple, des coûts inférieurs à 110% des coûts du véhicule de référence),
- une réduction sensible de la consommation de carburant fossile, essence ou diesel (par exemple, une consommation inférieure à 80% de la consommation du véhicule de référence),
- une réduction sensible des émissions en polluants issus de la combustion du carburant (par exemple, des émissions polluantes inférieures à 80% des émissions polluantes du véhicule de référence).

-A- Cette description initiale de l'objet concret visé VHP peut être représentée, à une date t_0 , par un ensemble $S_0(t_0)$ de propriétés évaluées $S_0(t_0) = \{P_i / \text{val}(P_i) = D_i\}_{i \in I_0}$ où P_i est une propriété intrinsèque ou relationnelle de l'objet concret visé \mathcal{O} , et où D_i est le domaine de valeurs dans lequel la propriété P_i doit se situer.

Le processus peut ensuite être poursuivi par la constitution d'une spécification technique du système $S_1(t_1)$ qui concrétise et traduit en termes techniques ce que signifie « performances générales équivalentes à celles du véhicule de référence », etc. Ce stade de concrétisation correspond à la quantification des effets attendus et des effets indésirables du système.

-B- La description intermédiaire de l'objet concret visé VHP , ainsi obtenue, peut être représentée, à une date t_1 , par un ensemble $S_1(t_1)$ de propriétés évaluées $S_1(t_1) = \{P_i / \text{val}(P_i) = D_i\}_{i \in I_1}$ où P_i est une propriété de l'objet concret visé \mathcal{O} , et où D_i est le domaine de valeurs dans lequel la propriété P_i doit se situer.

On a $S_0(t_1) \subset S_1(t_1)$, ce qui traduit une augmentation des déterminations de l'objet VHP . Toutefois, $S_0(t_1)$ peut être distinct de $S_0(t_0)$ ce qui en pratique traduit une évolution des attentes des différentes pour

des causes exogènes (les besoins ont changés) ou pour des causes endogènes (la détermination de $S_1(t_1)$ a nécessité une modification des exigences du niveau précédent).

Sur la base de la spécification technique du système $S_1(t_1)$, le processus peut être poursuivi par la constitution d'une architecture logique du système qui concrétise et traduit en termes de transformations et de chaînes de transformations capables de produire les effets recherchés (fonctions) du système et de limiter les effets indésirables du système.

-C- La description intermédiaire de l'objet concret visé \mathcal{VHP} , ainsi obtenue, peut être représentée, à une date t_2 par un ensemble $S_2(t_2)$ de propriétés valuées $S_2(t_2) = \{P_i / \text{val}(P_i) = D_i\}_{i \in I_2}$ où P_i est une propriété de l'objet concret visé \mathcal{O} , et où D_i est le domaine de valeurs dans lequel la propriété P_i doit se situer.

On a $S_0(t_2) \subset S_1(t_2) \subset S_2(t_2)$, ce qui traduit une augmentation des déterminations de l'objet \mathcal{VHP} . Toutefois, pour les mêmes raisons que celles indiquées ci-dessus $S_0(t_2)$ peut être distinct de $S_0(t_1)$ ainsi que $S_1(t_2)$ peut être distinct de $S_1(t_1)$.

Sur la base d'une architecture logique du système $S_2(t_2)$, le processus peut être poursuivi par la constitution d'une architecture physique du système qui concrétise et traduit en termes de transformateurs physiques et de chaînes de transformateurs physiques capables de produire les effets recherchés (fonctions) du système et de limiter les effets indésirables du système.

-D- La description intermédiaire de l'objet concret visé \mathcal{VHP} , ainsi obtenue, peut être représentée, à une date t_3 par un ensemble $S_3(t_3)$ de propriétés valuées $S_3(t_3) = \{P_i / \text{val}(P_i) = D_i\}_{i \in I_3}$ où P_i est une propriété de l'objet concret visé \mathcal{O} , et où D_i est le domaine de valeurs dans lequel la propriété P_i doit se situer.

On a $S_0(t_3) \subset S_1(t_3) \subset S_2(t_3) \subset S_3(t_3)$, ce qui traduit une progression dans l'augmentation des déterminations de l'objet \mathcal{VHP} .

Cette description permet la généralisation suivante

| Dates | t_0 | t_1 | t_2 | t_3 | | t_n |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|--|------------|
| Spécification opérationnelle | $S_0(t_0)$ | $S_0(t_1)$ | $S_0(t_2)$ | $S_0(t_3)$ | | $S_0(t_n)$ |
| Spécification système | | $S_1(t_1)$ | $S_1(t_2)$ | $S_1(t_3)$ | | $S_1(t_n)$ |
| Architecture logique | | | $S_2(t_2)$ | $S_2(t_3)$ | | $S_2(t_n)$ |
| Architecture physique | | | | $S_3(t_3)$ | | $S_3(t_n)$ |
| Fabrication | | | | | | $S_4(t_n)$ |
| Intégration | | | | | | $S_5(t_n)$ |
| Test | | | | | | $S_6(t_n)$ |

A chaque stade $i + 1$ du processus de développement, les concepteurs héritent des choix de conception faits aux stades précédents et des conséquences de ces choix. En d'autres termes les problèmes qui se posent au stade $i+1$ dépendent des choix précédents et la gamme des solutions possibles dépend désormais de ces choix.

Nous appelons **contexte de conception** ou encore **situation de conception** au stade $i+1$, l'ensemble des choix opérés aux stades précédents. Cette situation de conception au stade $i+1$ n'est autre que l'ensemble $S_i(t_{i+1})$ défini précédemment.

Autrement formulé, nous pouvons dire que l'ingénierie est une pragmatique (pragma = action) non seulement au sens courant du terme à savoir au sens d'une posture adaptée à l'action sur le réel, qui accorde la première place à l'action et à la pratique (Robert). Mais également dans un sens plus spécifique, qui s'intéresse aux actions et au sens de ces actions en situation et au rapport entre les actions et les parties prenantes comme la pragmatique linguistique s'intéresse tout particulièrement au sens des signes en situation et au rapport entre les signes et leurs utilisateurs.

Les choix de spécification, de conception ou de réalisation s'élaborent toujours dans une situation qui est l'accumulation des attentes et des choix antérieurs (conscients ou implicites) qui constitue le contexte de conception. Ce contexte peut s'avérer contraignant au point de conduire ultérieurement à des problèmes insolubles, à des impasses techniques, économiques ou sociales. La rencontre de telles impasses imposent alors de remettre en cause des choix antérieurs ou de devoir renégocier des niveaux d'exigence ou encore peuvent conduire à mettre un point final au projet.

La connaissance des états successifs de la situation de conception nous apparaît être une condition nécessaire à ces retours en arrière non seulement dans le cadre de projets d'ingénierie mais surtout dans le cadre de projets de ré ingénierie de systèmes.

6.2.3. L'ingénierie comme processus de synthèse des systèmes techniques

6.2.3.1. La conception et production comme synthèses

L'engendrement des systèmes concrets artificiels est analogues à celui des systèmes naturels, il s'effectue par synthèse, c'est-à-dire, « *en commençant par les objets les plus simples (...) pour monter peu à peu comme par degrés.*³¹ ».

Mais à la différence des systèmes naturels, les artefacts et les systèmes que les humains produisent font d'abord l'objet d'un processus de conception, dont Marx disait qu'il était une marque distinctive du faire humain, puisque « *ce qui distingue dès l'abord le plus mauvais architecte de l'abeille la plus experte, c'est qu'il a construit la cellule dans sa tête avant de la construire dans la ruche. Le résultat auquel le travail aboutit préexiste idéalement dans l'imagination du travailleur* »³².

Ce processus de conception, dont le siège est le(s) cerveau(x) du (des) concepteur(s), et dont on peut voir des matérialisations sous diverses formes, artefacts matériels : documents de conception, notes d'études et de calcul, modèles numériques, plans et schémas, est principalement un processus de synthèse mentale, c'est-à-dire la mise en relation (dans l'imagination) d'éléments épars, aboutissant à la formation d'une nouvelle entité. Cette nouvelle entité est un modèle d'un produit ou d'un système concret dont il(s) espère(nt) qu'il produira les effets attendus du fait de ses propriétés résultantes et émergentes.

Ainsi le processus de conception peut être appréhendé comme une anticipation, une simulation en pensée et en parole du processus de fabrication qui consiste également en une synthèse, physique celle-là, c'est-à-dire en l'assemblage effectif d'éléments concrets.

Produire un véhicule, c'est assembler et intégrer progressivement un ensemble de pièces physiques en assemblages, en organes, sous-systèmes et enfin le véhicule totalement intégré.

Concevoir un véhicule, c'est simuler en imagination et en parole, par anticipation ce processus de production :

- sélectionner des composants de technologie et de dimensions à définir,
- imaginer une architecture qui permette de mettre en relation ces composants,

³¹ René Descartes, Discours de la Méthode, seconde partie, p 18, Vrin

³² Karl Marx, Le Capital

- définir un mode d'assemblage qui intègre les différents composants en une nouvelle entité,
- estimer les performances de la nouvelle entité conçue.

Pour y parvenir, il va falloir que plusieurs groupes humains se mettent d'accord sur une prestation ou des prestations à rendre et sur la valeur de ces prestations, puis dans la foulée se mettent d'accord sur la manière de rendre cette ou ces prestations (conception générale et détaillée), s'accorder sur le façon de fabriquer, d'intégrer pièces, assemblages organes, sous- systèmes, de vérifier et de valider le système produit.

6.2.3.2. *Synthèse versus analyse*

Les problèmes de synthèse sont des problèmes inverses des problèmes d'analyse.

- Analyser un système donné, naturel ou artificiel, c'est mettre à jour sa composition interne et de sa structure interne pour pouvoir prédire son comportement dans un environnement déterminé. Si on se réfère à la théorie de Thomas Khun relatives à l'évolution des théories scientifiques, les problèmes scientifiques sont des problèmes d'analyse tant qu'ils s'inscrivent dans le cadre d'une science « normale » et qu'ils n'exigent pas de « révolution scientifique ».
- Synthétiser un système artificiel, c'est lui trouver une composition interne et une structure interne qui induise le comportement voulu dans un environnement déterminé. Les problèmes techniques ou d'action sociale ou politique sont toujours des problèmes de synthèse.

Selon nous, des problèmes de synthèse de systèmes sont tout à la fois l'inverse de problèmes scientifiques « normaux » (problèmes d'analyse), mais aussi de problèmes économiques, sociaux et éventuellement politiques, culturels et moraux.

Ainsi, le développement de l'industrie automobile au XXIème siècle a modelé le paysage économique, social politique et culturel des pays développés et en retour n'a pas été indifférent à des contraintes des mêmes ordres. On peut penser que ces contraintes augmenteront au cours du XXIème siècle.

En outre, en science, les problèmes inverses sont généralement réputés plus ardues que les problèmes directs (dériver une fonction est réputé souvent plus facile que de l'intégrer, analyser un composé chimique plus facile que de le synthétiser). Aussi peut-on penser que de concevoir un système soit un problème plus ardu que de l'analyser et que de ce fait les outils d'analyse soient insuffisants pour la conception d'un système.

6.2.4. *L'ingénierie comme processus d'entente entre des parties prenantes à propos du système*

Dans une section précédente (6.2.3), nous soutenions la thèse selon laquelle, l'ingénierie des systèmes techniques était principalement un processus de synthèse de modèles partiels en une représentation plus complète du système à produire et de ses systèmes de production, de maintien en condition opérationnel, voir de démantèlement.

Nous voudrions maintenant introduire la proposition suivante : l'ingénierie des systèmes techniques est également un processus de synthèse des points de vues des différentes parties prenantes. C'est une synthèse des points de vue des acquéreurs et de l'entreprise fournisseur, des différents acteurs de l'entreprise impliqués par le projet de fourniture. Cette synthèse nous l'appelons **accord** ou **entente**. On retrouve cette notion sous le terme d'« **agreement** » dans la littérature anglo-saxonne.

Dès lors le processus d'ingénierie d'un système apparaît comme un processus d'entente entre les différentes parties concernées visant à réaliser un accord entre elles à propos de propriétés (visées et obtenues) du système.

Nous proposons donc de définir une démarche réglée par la prudence en ingénierie comme une démarche constituée de cinq moments :

- premier moment est la *conception d'un problème d'ingénierie*.
- deuxième moment est la *conception des solutions envisageables*. Nous cherchons des solutions possibles à la question à traiter,
- troisième moment est le moment de la *délibération*. Parmi des solutions possibles, toutes n'ont pas la même valeur. Nous devons instruire autant que possible à charge et à décharge, c'est-à-dire rechercher les avantages et les inconvénients de chaque solution identifiée en les jugeant par rapport à des critères préalablement définis.
- quatrième moment est le moment de la *décision*. Nous choisissons une solution préférée parmi celles envisagées,
- cinquième moment est celui de *l'action*. La décision prise, nous déclinons les conséquences de ce choix sur le système à produire.

Ainsi la démarche proposée est essentiellement une démarche « délibérante » et ne prétend n'avoir à aucun moment l'exactitude de la rationalité scientifique qui nous parait non seulement hors d'atteinte mais encore hors de propos dans le domaine du faire.

Nous la précisons et l'illustrons dans les sections suivantes.

6.2.5. L'ingénierie comme processus collectif de décisions justifiées

Dans cette section nous nous proposons de définir un dispositif permettant à un ensemble de parties prenantes de se mettre d'accord sur la spécification opérationnelle et technique d'un système, sa conception et sa production.

Ce dispositif d'ingénierie collective et coopérative est fondé sur la théorie de l'argumentation dont les aspects principaux ont été présentés par F. Van Eemeren [EEM 96].

Ce dispositif constitue pour nous une réponse à :

- la rationalité, les connaissances et les compétences limitées de chaque partie prenante, prise isolément,
- la tendance avérée des concepteurs de limiter leurs explorations à la première solution apparemment acceptable sans chercher plus loin,
- la nécessité de trouver des accords entre parties prenantes sur les buts, les performances et caractéristiques internes du système,
- la nécessité de constituer une mémoire des situations de conception successives et des justifications qui leur sont associées et ainsi permettre une capitalisation vivante, en situation des connaissances de l'entreprise.

6.2.5.1. L'auditoire

La première composante du dispositif est l'**auditoire**, constitué par un ensemble de pairs. Il forme à la fois le cadre du travail en coopération et un concepteur collectif. Il rassemble différents rôles tels que les rôles d'architecte, de spécialiste et éventuellement le garant.

Aux **spécialistes**, revient la tâche d'apporter les éléments d'argumentation, d'appréciation et de justification pour former la matière des délibérations que la situation de conception appelle. Si on rapproche une situation de conception ou plus généralement une situation d'ingénierie à la situation judiciaire, les spécialistes correspondent aux auxiliaires de justice, avocats des parties, experts, mais aussi le ministère public.

Aux **architectes**, revient la tâche d'arrêter, en dernière instance, les questions à traiter, les options à envisager et les décisions prises à l'issue des délibérations. Si on rapproche cette situation à la situation judiciaire, les architectes correspondent aux juges, juges d'instruction et juges d'audience qui vont arrêter leurs décisions et les motiver à partir des éléments mis en lumière au cours des délibérations.

Au **garant**, revient la tâche d'assurer que la procédure se déroule correctement, que les termes des débats sont correctement posés, que les différents acteurs ont un droit de parole équitable. Si les architectes arbitrent sur le fonds de la procédure, le garant a une responsabilité vis-à-vis de la forme de celle-ci. Par analogie avec la situation judiciaire, le garant tient la place du président du tribunal.

Concrétisations de l'auditoire, auditoire universel et auditoires particuliers.

| La réunion critique de conception | | |
|-----------------------------------|-------------------|--|
| | Synchronie | Diachronie |
| Unité de lieu | Réunion classique | Outil de conception et de justification multi-utilisateurs |
| Lieux Multiples | Vidéo Conférence | Outil de conception et de justification multi-utilisateurs |

6.2.5.2. La procédure

La procédure que nous allons décrire ci-dessous constitue la deuxième composante du dispositif que nous proposons de mettre en place pour qu'un ensemble de parties prenantes puisse se mettre d'accord sur la spécification opérationnelle et technique d'un système, sa conception et sa production.

Cette procédure introduit comme notions clés les notions suivantes: questions d'ingénierie, les alternatives, les critères d'évaluation, les arguments et les évaluations, les délibérations et les choix.

6.2.5.2.1. Les questions et les alternatives

La procédure consiste à engager l'auditoire sur une séquence de **questions** non définies à l'avance quant à leurs contenus et à leur ordonnancement. Elle s'inspire des travaux de Raymond McCall (concepteur du formalisme PHI - Procedural Hierarchy of Issues-), qui représente le réseau de décisions sous la forme d'un arbre.

Les questions concrètes que l'auditoire va être amené à se poser, vont directement dépendre du déroulement effectif de la procédure. L'ordre dans lequel ces questions vont être posées est également déterminé par le déroulement effectif de la procédure.

Cette séquence s'inscrit dans un arbre de décisions successives. Cet arbre comporte deux types de nœuds, des nœuds « questions » (Issues) suivis de nœuds « alternatives » (Options), comme représenté sur la figure ci-dessous :

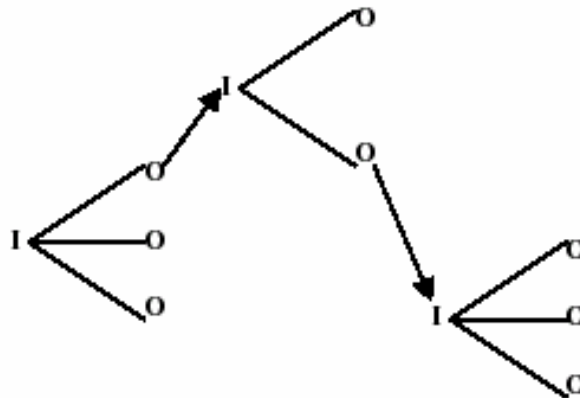


Figure 6.18. Arbres des décisions

La sélection d'une alternative constitue une décision qui, d'une part concrétise un peu plus le système, et d'autre par contraint nécessairement le contexte de conception. Si le choix d'une alternative ne soulève plus aucune question nouvelle, on peut considérer que la conception est terminée et la définition du système concrète et acquise.

Dans le cas contraire, de nouvelles questions sont soulevées dans le contexte courant (par exemple le contexte A_{22}). Dans ce contexte, la question I_3 est posée, on peut alors considérer que I_3 est une sous question de I_2 au sens où McCall l'entend, c'est-à-dire que la résolution de I_3 contribue à la résolution du I_2 et de proche en proche contribue partiellement à la résolution de la question initiale qui est de fournir la conception de produits réalisables correspondant aux attentes de l'acquéreur.

L'impossibilité de donner une réponse satisfaisante à I_3 signifie vraisemblablement que la réponse fournie à la question I_2 n'était pas satisfaisante et qu'il convient d'effectuer un retour en arrière.

Ainsi, un produit conceptuel ou un modèle de système concret, résultat d'un processus de conception dépend d'une part du collectif réuni pour le concevoir et d'autre part du chemin emprunté pour le concevoir.

Toutefois, il reste néanmoins possible de définir une typologie des questions qui se posent en conception de système.

Nous pouvons ainsi distinguer différentes sortes de questions :

- les questions de spécification de performances et de seuils d'acceptabilité,
- les questions « fonctionnelles »,
- les questions d'architecture,
- les questions d'allocation,
- les questions de dimensionnement,
- les questions de technologie.

Etant entendu que l'ordre ci-dessus constitue un ordre préférentiel pour séquencer les questions de conception même si, dans la pratique, plusieurs questions peuvent se poser simultanément sans qu'il soit possible de définir un ordre de préséance.

A chaque question que l'auditoire a décidé de traiter, un ensemble des réponses alternatives sont proposées par l'auditoire. Il s'agit de réponses dont on ne sait si elles sont acceptables mais qui sont

seulement plausibles. Rien ne permet d'affirmer à ce stade du processus si au moins une des réponses est acceptable et il convient donc d'instruire le dossier, c'est-à-dire de déterminer autant que possible quels avantages et quels inconvénients présentent chacune des solutions alternatives.

6.2.5.2.2. Les critères

L'instruction de chacune des solutions alternatives doit se faire de manière homogène, c'est-à-dire par rapport à une liste de critères qui peut varier en fonction du contexte (de la question à traiter).

Toutefois, ces critères ne sont en fait rien d'autre que les exigences auxquelles le système à concevoir doit répondre.

Pour notre part nous rattachons cette notion d'exigence à la notion de propriété d'un système (voir la section 6.1.2 La synthèse des exigences). Formuler une exigence à propos de ce système consiste à fixer à l'une des propriétés de ce système un domaine de valeurs. Ainsi, l'énoncé « la masse du véhicule en ordre de marche ne devra pas excéder 1,5 T » constitue une exigence appliquée à un système véhicule.

Dès lors, l'instruction de chacune des solutions alternatives devrait se faire par rapport à des critères comme les suivants :

- Critères physiques, comme par exemple, des exigences relatives à la masse, au volume ou à la forme géométrique de la solution.
- Critères « fonctionnels », comme par exemple, des exigences relatives aux performances des effets recherchés de la solution (comme la puissance développée, MTTR³³) mais aussi des effets non recherchés ou indésirables de la solution (comme la consommation de puissance ou les nuisances) mais aussi des incertitudes liées à ces performances (risques sur les performances).
- Critères économiques tels que des exigences relatives aux coûts de développement, de fabrication puis d'exploitation, de maintien en condition opérationnelle et de démantèlement d'une solution mais aussi des incertitudes liées à ces coûts (risques sur les coûts).
- Critères de conformité aux caractéristiques des processus du système tels que les exigences relatives aux temps des différentes phases du cycle de vie du système (développement, fabrication, vie opérationnelle, maintenance et de démantèlement) d'une solution mais aussi des incertitudes liées à ces temps (risques sur les délais).

Il est également possible d'insérer dans la liste des critères d'autres exigences, comme par exemple, les critères de bonne conception proposés par l' Axiomatic Design de Nam Suh dans son [SUH 01], à savoir :

- Ne retenir comme solutions candidates les solutions de conception qui respecte l'axiome dit « **axiome d'indépendance** » qui prescrit de conserver l'indépendance des exigences fonctionnelles (FRs) lors du choix des paramètres de conception (DPs), puis lors du choix des valeurs de processus (PVs).
- Sélectionner comme solution préférée (parmi les solutions candidates) celle qui respecte l'axiome dit « **axiome d'information** », c'est-à-dire celle dont le contenu informationnel (IC, information content) est minimum.

6.2.5.2.3. Evaluation et arguments

Une fois établie la liste des critères d'évaluation, il devient alors possible d'instruire chacune des solutions alternatives et de les évaluer par rapport aux différents critères et donc d'ordonner les différentes solutions par rapport aux différents critères. Nous obtenons alors des séries telle que :

- $O_2 <_1 O_3, O_1 <_1 O_4 <_1 O_5$ qui peut se lire de la manière suivante : par rapport au critère 1, O_1 est la pire des solutions, précédée de O_3 et O_1 qui sont comparables, précédées de O_4 , précédée de O_5 qui est la meilleure des solutions.

³³

Mean Time To Repair : Temps moyen de bon fonctionnement avant défaillance.

On aurait pu accorder également aux différentes solutions une note entre 1 et 10 et nous aurions ainsi : note (O_2) = 3 note (O_3) = note (O_1) = 5, note (O_4) = 6 note(O_5) = 8. Toutefois, il importe de voir qu'avec un système de notations nous héritons immédiatement d'une arithmétique pour le meilleur et pour le pire. Ce qui est important ce n'est pas que O_2 vaille 3 et O_4 deux fois plus mais de savoir pourquoi O_4 a été jugée préférable à O_2 mais aussi à O_3 en d'autres termes quels sont les arguments qui font qu'un concepteur unique ou qu'une assemblée de pairs préfère O_4 à O_2 .

Ce qui importe est peut-être la note ou la préférence mais importent encore davantage les raisons ou arguments justificatifs de la note ou de la préférence.

En effet, la note ou plutôt la préférence attribuée à une solution dépend étroitement des contextes dans lesquels cette solution est évaluée puis sera mise en œuvre. Or ces contextes varient au fur et à mesure du processus de conception (ou dans le cadre d'une re-conception), c'est-à-dire que des hypothèses formulées à un moment donné peuvent être mise en défaut tandis que d'autres s'imposent ultérieurement. Ces variations du contexte peuvent directement ou indirectement invalider des jugements de valeur posés sur les différentes solutions qui sont alors à reconsidérer dans les nouveaux contextes.

Nous partons alors de l'analyse que le logicien et mathématicien britannique Stephen Toulmin a pu faire de l'argumentation [TOU 93].

Qu'il s'agisse d'une discussion de la vie professionnelle ou de la vie courante, le schéma de base d'une argumentation se présente comme suit :

- Pour être acceptée par un auditoire dubitatif, une affirmation (claim) proférée par un locuteur doit pouvoir être étayée par des faits (**data**). C'est ce qui se produit, lorsqu'à l'appui d'une thèse, le locuteur invoque une série d'exemples³⁴ censés parler d'eux-mêmes.
- Si l'auditoire reste incrédule, malgré la pertinence supposée des exemples, il est alors nécessaire d'explicitier le mécanisme permettant de réaliser l'induction qui assure le passage des exemples à la thèse. Ce mécanisme est une règle d'inférence appelée **warrant** dans la théorie de Toulmin. Le mécanisme invoqué peut être une règle formelle réputée vraie comme une loi physique si on a la chance de se trouver dans un champ où ce type de mécanisme est pertinent. Mais dans le domaine de l'action ou de la production et donc dans celui de l'ingénierie, les mécanismes invoqués ne peuvent avoir systématiquement la robustesse des lois scientifiques et s'appuie souvent sur des heuristiques tirées de l'expérience et de la vie pratique.
- Dans ces conditions, un auditoire particulièrement vigilant peut réclamer des assurances supplémentaires et notamment un affermissement de la garantie (warrant). Ceci peut s'obtenir d'une part en adossant celle-ci à des mécanismes de deuxième rang ou **backing** et d'autre part en limitant la portée de l'argumentation à un domaine limité par des zones d'exclusion ou **rebuttal**.

En résumé le schéma élémentaire d'argumentation décrit par Toulmin peut être mis dans la configuration spatiale suivante :

³⁴

Il s'agit du sens premier de paradigme, exemple venant confirmer une thèse.

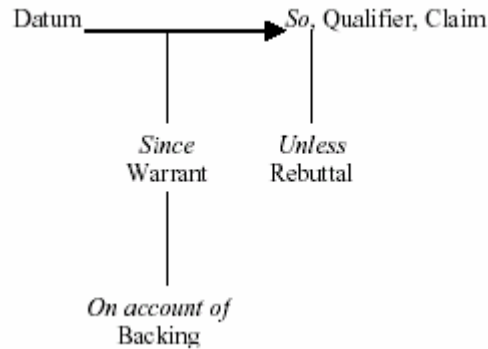


Figure 6.19. Le schéma argumentatif de base de S. Toulmin

Un dernier point concerne la force probante de l'affirmation proférée par le locuteur. Elle peut avoir différentes intensités comme celles que nous mettons derrière des modalités (**qualifier**) telles que 'possible', 'probable', 'quasi-certain' ou 'pratiquement certain' ou 'certain à 99%'.

En ingénierie, les arguments que nous invoquons, en faveur ou en défaveur d'une solution, sont pour l'essentiel³⁵ des :

- arguments économiques,
- arguments scientifiques ou techniques,
- arguments juridiques.

Nous en produisons ci-dessous un exemple qui résulte d'une étude de marché produite par l'EPRI [EPRI 2000]. Cette dernière concerne le positionnement relatif de deux propriétés d'un véhicule hybride électrique, une mesure de la préférence accordée à ce véhicule par le marché américain en 2010 par rapport au prix du véhicule. Ce positionnement est produit selon trois configurations de véhicule : HEV 0, c'est-à-dire que le véhicule ne dispose d'aucune autonomie en mode de traction électrique, HEV 20 concerne un véhicule dont l'autonomie en mode de traction électrique serait de 20 miles et HEV 60, 60 miles.

Le schéma montre alors que pour procurer une préférence de 50, le surcoût admissible par rapport à un véhicule conventionnel comparable ne doit pas excéder 10% pour un HEV0, 16% pour un HEV20 et 25% pour un HEV60.

³⁵ Ceci n'exclut pas évidemment la possibilité d'arguments d'autorité dans ses aspects positifs (les dits d'experts) mais également négatifs. Toutefois, le caractère public de la procédure rend inconfortable et dangereuse cette dernière catégorie d'arguments d'autorité, de plus elle laisse des traces.

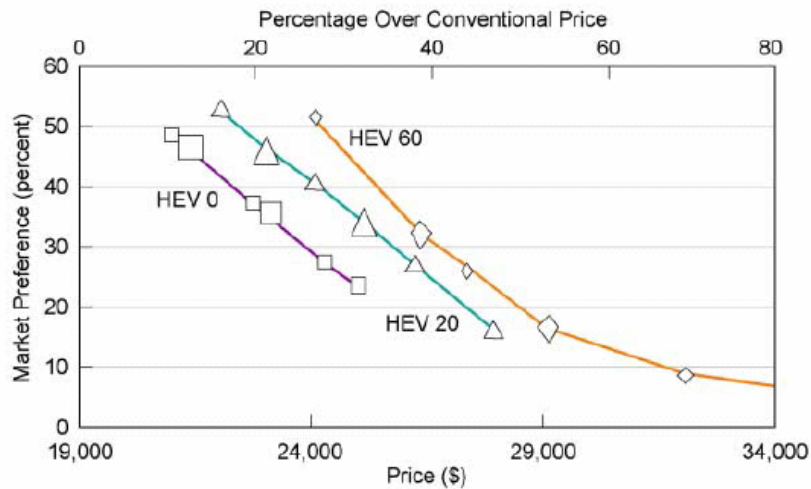


Figure 6.20. Parts de marchés en 2010 d'un hybride milieu de gamme vs son prix.

Ainsi pour un véhicule hybride électrique parallèle, l'autonomie en traction électrique (exprimée comme exigence HEV N, où N représente l'autonomie en traction électrique, exprimée en miles, par exemple HEV 0, HEV 20 et HEV 60) est en rapport direct avec les performances de la batterie de traction et entre directement en conflit avec le coût, l'encombrement et la masse embarquée. Il y a donc un compromis à trouver, entre ces différentes exigences, lequel doit conserver un attrait pour ce type de véhicule.

On voit par exemple sur la figure ci-dessus qu'un HEV 0 (i.e. autonomie 0 miles en traction électrique) peut prétendre à près de 50% de parts de marché sur ce segment à condition de ne pas coûter plus de 10% qu'un véhicule conventionnel aux performances équivalentes. Pour un HEV 20 ou un HEV 60 un score équivalent peut être atteint si le surcoût ne dépasse pas 18 et 26%.

Ces données d'études de marché (d'une fiabilité qu'il reste à apprécier) rapprochées des données de coûts présenté sur la figure suivante constituent des éléments pour une délibération et une décision sur le niveau d'autonomie en traction électrique requis pour un véhicule hybride à horizon de 2010.

Le tableau suivant présente les coûts estimatifs des constituants d'un groupe moto propulseur hybride électrique en 2010.



Figure 6.21. Coûts des composants d'un GMP en 2010.

Ces éléments de prospective socio-économiques constituent des faits (data, au sens de Toulmin) pouvant soutenir une thèse (Claim) intervenant dans une délibération.

6.2.5.2.4. La délibération ou pesée des arguments et le choix

La pesée des arguments est à la fois une opération (le mot délibération vient de liber = poids) très problématique pour un théoricien puisqu'elle revient à comparer des incommensurables et en même très banale dans la vie courante. Derrière tout acte d'achat, il y a une opération de ce type.

Ainsi, considérons un ensemble de 5 produits rendant plus ou moins bien un service S_1 pour un prix d'acquisition P_2

- $O_2 <_1 O_3, O_1 <_1 O_4 <_1 O_5$. (ici O_2 représente le produit bas de gamme)
- $O_4 <_2 O_3 <_2 O_1 <_2 O_5 <_2 O_2$. (ici O_2 représente le produit moins coûteux)

Le choix de O_2 traduit le comportement suivant « Dans le contexte dans lequel je me situe aujourd'hui, pour le type de service S_1 , je ne peux ou je préfère acquérir le produit le moins cher » tandis que le choix de O_5 traduit plutôt « Dans le contexte dans lequel je me situe aujourd'hui, pour le type de service S_1 , je préfère acquérir le produit qui offre le meilleur niveau de performance ».

En d'autres termes, la pesée des arguments est relative à un contexte et à un auditoire. Elle n'aboutit pas à une solution unique comme pourrait le laisser croire une simple opération arithmétique comme on peut en voir dans des guides pour consommateurs avertis (ou influençables).

Il en ressort que peser des arguments et effectuer un choix revient à mettre à jour le système des préférences d'un auditoire à un moment donné, dans un contexte donné. Comme nous l'avions déjà souligné dans le paragraphe 6.2.5.2.3 Evaluation et arguments, ce qui importe est certes le choix mais les raisons ou arguments justificatifs du choix importe tout autant et ceci pour les mêmes raisons.

Le choix d'une solution préférée dépend étroitement du contexte (situation de conception) dans lequel cette solution a été préférée. Or cette situation de conception varie au fur et à mesure du processus de conception (ou dans le cadre d'une re-conception). Ces variations de la situation de conception peuvent

directement ou indirectement invalider des choix effectués antérieurement et qui sont alors à reconsidérer dans la nouvelle situation de conception.

6.2.5.2.5. L'enregistrement du processus d'ingénierie

La mise en place de la procédure que nous venons de décrire a encore davantage de pertinence si une trace (écrite, audio, vidéo, etc.) de son déroulement est enregistrée, dans le but de mémoriser, autant que possible, les situations successives qui ont jalonné le processus d'ingénierie du système. Ces enregistrements forment à nos yeux les éléments constitutifs de la mémoire technique de l'entreprise.

Les moyens utilisés pour assurer cet enregistrement peuvent être très divers. De la simple trace écrite à l'utilisation d'outils multimédia capables de capturer des réseaux hypertextes, des graphiques, des enregistrements audio ou vidéo.

Des formalismes existent, comme :

- (a) « Question-Option-Criteria » -QOC- [LEA 96], [SHU 97]
- (b) Issue-Based Information Systems – IBIS – [RIT 72],
- (c) Procedural Hierarchy Issues – PHI – [MCA 91],

d'autres restent, peut être, à développer.

Par ailleurs, des outils existent également comme Compendium (<http://www.compendiuminstitute.org/>) développé avec le concours du « Knowledge Media Institute - Open University » (<http://kmi.open.ac.uk/>) qui est un important centre de recherche sur la conception (éditeur notamment de la revue « Design Studies »).

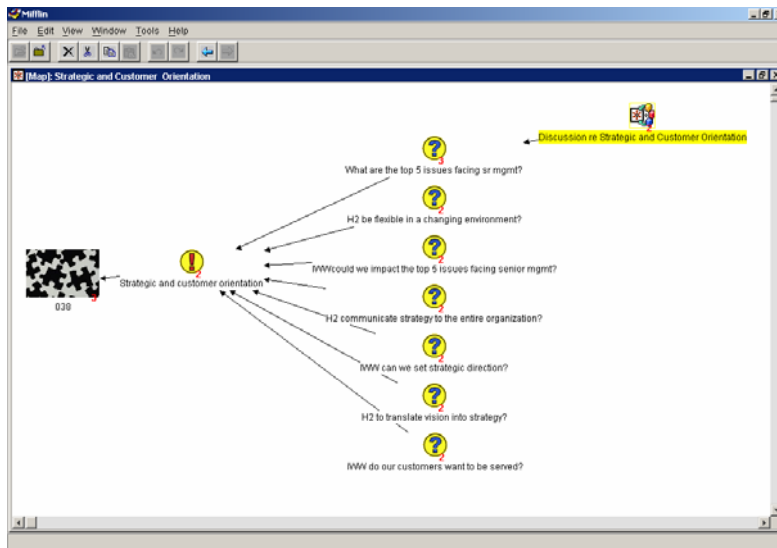


Figure 6.22. Copie d'écran de Compendium

Construire autour d'un processus outillé de décisions et de justifications un outil de conception de systèmes ou intégrer à des outils de conception de systèmes existants un processus outillé de décisions et de justifications pourraient également constituer des alternatives. Alors que cette intégration semble être écartée pour le moment [SML 06], elle pourrait conférer à SysML une véritable utilité, autre que celle de créer un consensus (ce qui serait déjà une bonne chose).

6.2.5.3. *Ingénieries spécialisées et ingénierie système*

Nous désignons sous le terme d'ingénieries spécialisées, des ingénieries directement adossées à des théories spécifiques telles que nous avons pu les définir au chapitre 5.1.3.2.

Le calcul des structures, l'ingénierie des moteurs électriques, l'ingénierie des coûts et le calcul de disponibilité constituent des exemples de ces ingénieries spécialisées. Elles sont le fait d'experts dans des domaines techniques, économiques définis. Ces experts sont en mesure :

- d'imaginer des solutions pour un problème donné, du point de vue de leur spécialité en puisant dans le corpus des connaissances dont ils disposent relativement à cette spécialité et
- d'évaluer les solutions envisagées à un problème donné, du point de vue de leur spécialité, en construisant des argumentaires conséquents, adossés au corpus des connaissances dont ils disposent relativement à cette spécialité et qui confère parfois à ceux-ci la force probante d'une démonstration scientifique. Ces argumentaires prennent alors la forme de notes de calcul, de résultats de simulations, d'enquêtes statistiques et d'analyses probabilistes, encore parfois de « dits d'expert ».

On peut considérer alors l'ingénierie de systèmes comme une activité dialectique (à la racine de dialectique, il y a dialogue) ou encore comme une activité rhétorique utilisant, pour progresser, les ressources offertes par les théories spécifiques et les ingénieries spécialisées dans le but de finaliser un accord entre des parties prenantes quant à la synthèse d'un système concret artificiel dont ils ont la responsabilité.

6.2.5.4. *La justification des choix et ingénierie des connaissances*

Il n'est pas rare que des entreprises se plaignent de problèmes de pertes de connaissances sur des systèmes qu'elles ont conçus et produits. Elles se lancent alors parfois dans de coûteuses et improbables campagnes de (re-)capitalisation des connaissances dont elles ont disposées à un moment donné.

Cette situation fait contraste avec le moment où ces connaissances étaient là, disponibles (presque) gratuitement, mais où toutes les énergies étaient tournées vers le résultat concret de la conception et de la production. A ce moment là, seul le but à atteindre comptait tandis qu'étaient vécus comme pertes de temps et comme sans valeur, les embûches rencontrées, les chemins parcourus, en particulier les chemins rebroussés, les raisons des options prises, les raisons des options rejetées, etc. Or ce qui était à ce moment là, tenu pour résistance à l'avancement, constitue précisément le patrimoine de connaissances de l'entreprise, le moyen, le levier par lequel l'entreprise est parvenue au résultat.

La justification des choix est la trace écrite du processus de conception, de l'ensemble des situations de conception par lesquelles le projet est passé, des questions de conception que le projet s'est posé au cours de ce processus, des différentes alternatives de solution que le projet a examinées pour résoudre ces questions, de l'analyse de ces solutions et des décisions qui ont conduit à opter pour une alternative au détriment de celles qui lui étaient opposées.

Cette justification se présente alors de la même manière comme la trace d'un arbre de décisions constitué des entités suivantes :

- La trace des questions posées explicitement,
- La trace des alternatives envisagées pour répondre à ces questions,
- La trace des critères mis en avant pour permettre de départager les différentes alternatives envisagées,
- La trace des arguments plaidant en faveur ou en défaveur des différentes alternatives par rapport aux critères identifiés,
- La trace des décisions prises au vu des arguments avancés.

Chapitre 7

Véhicules Hybrides Electriques

Dans ce dernier chapitre de notre travail, nous effectuons une incursion dans l'univers de la conception de véhicules particuliers. Cette incursion a pour but d'illustrer la partie technique de notre travail théorique à partir d'éléments puisés à l'occasion d'un projet industriel auquel nous avons participé, celui de la conception, en innovation, de chaînes de traction hybrides parallèles.

Il est donc destiné à montrer comment certains thèmes abordés au cours de notre travail peuvent être prolongés pratiquement et mis en oeuvre sur des cas d'application. Toutefois nous avons écarté la perspective d'une validation des propositions que nous avons formulées pour deux raisons :

- l'une d'ordre pratique, les dimensions de ce travail ne pourraient y suffire,
- l'autre à une base plus théorique: nous ne pensons pas que la validité de propositions méthodologiques puissent être établie de façon définitive. A l'instar de ce que Karl Popper soutenait à propos des théories scientifiques³⁶ dans « *la logique de la découverte scientifique* », les méthodes ne sont pas vérifiables, elles peuvent être tout au plus corroborées.

Nous avons relié nos propositions à ces illustrations directement dans le corps de texte en faisant référence directement au paragraphe contenant la proposition utilisée.

7.1. Le principe de véhicule hybride

Trois objectifs principaux sont assignés aux véhicules particuliers « non conventionnels »: (1) offrir des prestations analogues aux véhicules particuliers conventionnels, (2) réduire la consommation de carburant, (3) réduire les émissions de CO₂ dues aux véhicules particuliers.

Avant de présenter le concept de véhicule hybride, nous passons en revue, un ensemble de solutions de propulsion susceptibles de contribuer à la maîtrise des émissions de CO₂ occasionnées par les véhicules particuliers. Ces alternatives sont les voies de solution que la communauté des ingénieurs automobiles imagine, à un moment donné, comme susceptibles d'apporter une réponse au problème posé.

La maîtrise des émissions de CO₂ occasionnées par les véhicules particuliers apparaît comme la question (Issue) à la racine des efforts de conception et d'innovation, présentés ci-dessous, elle est également à la racine de la procédure que nous avons décrite dans le paragraphe 6.2.5.2.1, Questions et alternatives).

³⁶

« Les théories ne sont pas vérifiables, mais elles peuvent être « corroborées » ».

Les différentes alternatives envisagées pour tenter de maîtriser les émissions de CO₂, sont récapitulées dans le tableau ci-dessous. Ce tableau compare la quantité de CO₂ émise par km parcouru en fonction de la source d'énergie utilisée : hydrogène liquide produite par électrolyse (électricité d'origine thermique), essence, gazole, ETBE³⁷, Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), Gaz Naturel pour Véhicule (GNV), Biocarburants (EMHV³⁸), hydrogène comprimée produite par électrolyse (électricité d'origine nucléaire), électricité d'origine nucléaire.

Ce tableau illustre le peu de perspectives en matière de maîtrise des émissions de CO₂ qu'offrent certaines voies technologiques comme le GPL ou encore d'un biocarburant comme l'ETBE.

Il conditionne très nettement l'intérêt écologique de la pile à combustible (FCV- Fuel Cell Vehicle-) au mode de production de l'hydrogène utilisé. Il laisse par contre ouvertes diverses alternatives comme certains biocarburants ou l'électricité (d'origine nucléaire).

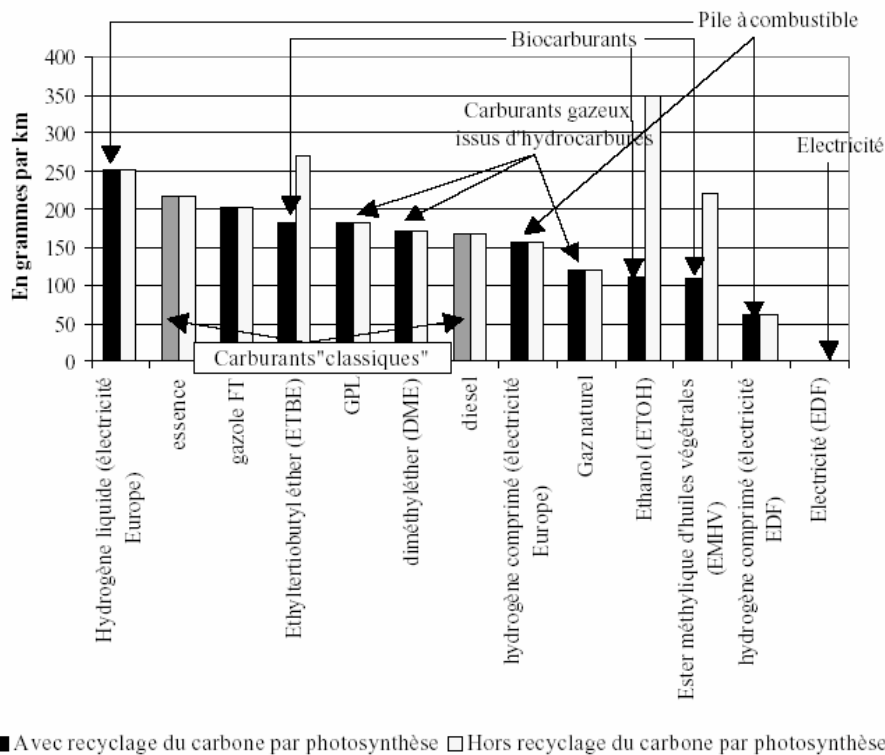


Figure 7.1. Emissions de CO₂ du puits à la roue.

Soulignons que l'analyse de ces alternatives, éminemment complexe, dépend largement de conditions socio-économiques mouvantes, évolutions géopolitiques, cours de pétrole dans les prochaines décennies mais également niveau et forme de la demande de mobilité, rythme de l'innovation technique, etc.

Il suffirait que des innovations majeures interviennent dans des domaines tels que la production d'énergie électrique et du stockage de cette énergie pour que la donne s'en trouve entièrement bouleversée. Mais quel pronostic pourrions-nous faire aujourd'hui à propos de telles innovations ?

³⁷ Ethyl-tertio-butyl-éther.
³⁸ Esters méthyliques d'huiles végétales.

Dans ce paysage, le **concept de véhicule hybride et de chaîne de traction hybride** prend acte d'une part de l'efficacité des solutions conventionnelles en terme de performances et d'autonomie et d'autre part de la « propreté » des solutions électriques (ZEV³⁹).

Il propose un mixte, une hybridation, de ces deux types de solutions de manière à mettre au point un véhicule qui ne retiendrait que les « bonnes propriétés » des deux lignées dont il hérite, à savoir un véhicule « propre » ([S[U]]LEV⁴⁰) disposant des performances et de l'autonomie pour un coût de possession comparable à celui de ses parents. La technologie hybride ne se présente donc pas comme une technologie de « rupture » par rapport aux technologies thermiques conventionnelles comme pourrait, au contraire, se présenter, par exemple, les technologies de **piles à combustible**. Au contraire, la technologie hybride s'inscrit dans une continuité de ses deux lignées, celle des véhicules à traction thermique et celle des véhicules à traction électrique.

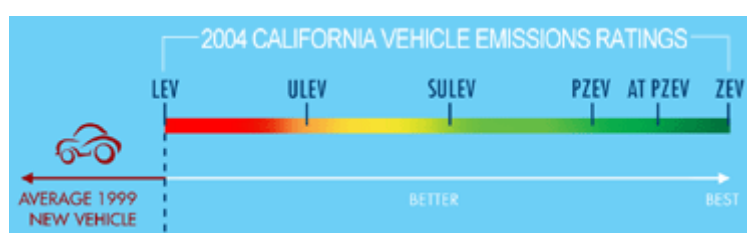


Figure 7.2. Propreté des véhicules selon le California Air Resources Board (CARB)

Ainsi un véhicule hybride peut être présenté soit comme (1) un véhicule électrique dont les performances et l'autonomie sont étendues (« range extender ») grâce à l'appoint d'une machine thermique, soit comme (2) un véhicule thermique dont la consommation et les émissions de CO₂ sont minimisées grâce à l'utilisation d'une machine électrique.

Si nous adoptons ce deuxième mode de présentation, nous pouvons partir de trois constats :

- **Le fonctionnement des moteurs thermiques des véhicules thermiques est très largement sous optimal.**

On peut représenter le domaine de fonctionnement d'un moteur thermique (diesel ou essence) dans un repère dont l'axe des abscisses porte la vitesse rotationnelle du vilebrequin ω (en tr/mn) et l'axe des ordonnées porte le couple moteur (en N.m). Chaque point de fonctionnement du moteur correspond alors à un couple (ω, C) .

On peut définir, pour chaque point de fonctionnement du moteur thermique, la consommation spécifique, exprimé en g/kWh, et traduisant le rendement de la transformation thermique pour le point de fonctionnement considéré. La consommation spécifique peut être exprimée en quantité de carburant consommée ou en quantité de CO₂ émise. En effet, en supposant la combustion complète, la quantité de CO₂ dégagée par un moteur est donc proportionnelle à sa consommation du carburant qu'il utilise (<http://www.ademe.fr/>). Si on examine alors le domaine de fonctionnement d'un moteur thermique, on peut définir d'une part des courbes d'iso-consommation, c'est-à-dire des courbes définies par $f(\omega, C) = C^{ste}$ et d'autre part, une courbe de couple pour une consommation optimale $C_{opt} = f(\omega)$, c'est-à-dire le lieu des points de fonctionnement (ω, C) du moteur thermique pour lesquels le rendement est optimal quand ω varie dans son domaine de définition (généralement entre 1000 et 6000 tr/mn).

³⁹ Zero Emission Vehicle

⁴⁰ [Super[Ultra]]Low Emission Vehicle, selon les définitions fixées par le California Air Resources Board

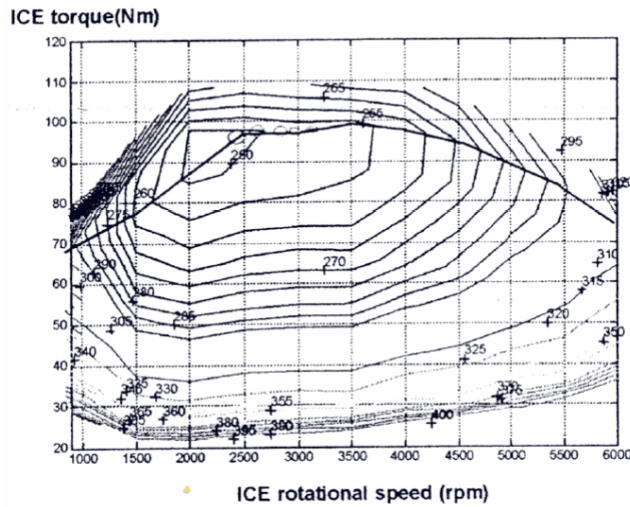


Figure 7.3. Cartographie moteur thermique et courbe de consommation optimale.

Si le fonctionnement d'un moteur thermique est asservi à cette courbe, dite de consommation optimale, par abus de langage, alors ce fonctionnement minimise à la fois la consommation de carburant et les émissions de CO₂.

En pratique, le fonctionnement d'un moteur thermique d'un véhicule conventionnel est très éloigné de ce fonctionnement optimal comme le montre la figure ci-dessous sur laquelle ont été portés les points de fonctionnement d'un moteur thermique d'un véhicule conventionnel lors d'un parcours normalisé (cycle UF2).

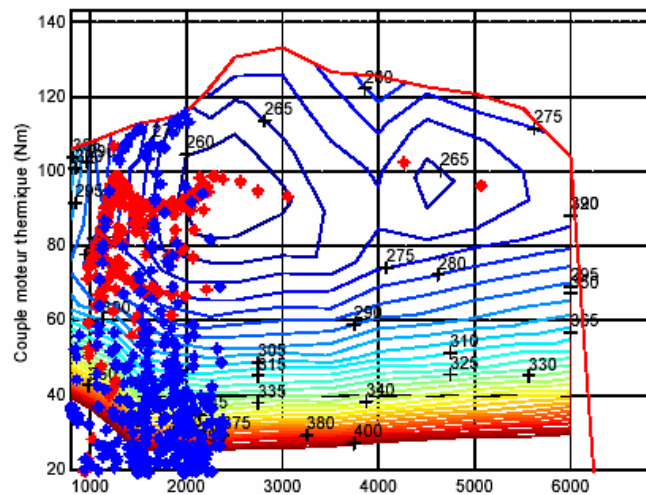


Figure 7.4. Points de fonctionnement du moteur d'un véhicule thermique au cours d'un cycle UF2.

N'existerait-il pas un couplage judicieux du moteur thermique et d'une machine électrique qui permettrait de ne mettre en oeuvre le moteur thermique qu'au voisinage de sa courbe de consommation optimale ?

- **Le moteur d'un véhicule à propulsion thermique tourne souvent alors que le véhicule est à l'arrêt notamment dans le trafic urbain et périurbain.**

Dans le trafic urbain et périurbain, les véhicules sont fréquemment à l'arrêt, notamment, aux feux de circulation ou dans les embouteillages. Dans ces situations, le moteur thermique, débrayé du reste de la chaîne de traction, tourne en pure perte (sauf si un compresseur de climatisation est enclenché) et de surcroix, dans des plages de fonctionnement sous optimales.

N'y aurait-il pas alors un avantage, dans ces situations, à couper le moteur thermique et à utiliser la machine électrique comme moteur de traction électrique ?

- **Un véhicule à propulsion thermique se présente comme un accumulateur d'énergie cinétique, laquelle est dissipée pour rejoindre la position arrêt.**

Cette énergie cinétique résulte de la conversion d'une énergie latente stockée dans un carburant fossile. Un accroissement de cette énergie cinétique nécessite une conversion supplémentaire d'énergie latente. En revanche, une diminution de cette énergie cinétique s'effectue dans la plupart des cas en procédant à un freinage dissipatif. Il s'agit donc d'un freinage en « pure perte ».

N'y aurait-il pas un parti à tirer de cette énergie en la récupérant, par exemple, dans une batterie grâce à une machine électrique fonctionnant comme générateur⁴¹ ?

Ces trois constats militent donc en faveur d'une hybridation des moteurs thermiques des voitures particulières polyvalentes de manière à améliorer sensiblement le rendement de ces machines dans les différents contextes d'utilisation dans lesquels elles peuvent être mise en œuvre et de ce fait de réduire en proportion les quantités de CO₂ qu'ils sont amenés à émettre.

7.2. Ingénierie des Exigences appliquées à un véhicule hybride

Pour induire une réduction des émissions de CO₂, et également une réduction de la consommation des carburants fossiles, les projets de véhicules hybrides doivent, au final, concerner le véhicule particulier de grande diffusion à usage polyvalent (usages urbain, périurbain, routier et autoroutier), la voiture de « monsieur ou madame Tout-le-monde », qui l'utilise pour aller au travail, pour aller faire ses courses à la périphérie des grandes villes et qui la prend pour partir en vacances.

L'utilisateur ou plutôt les utilisateurs-types ont des emplois de leurs véhicules et des budgets que les constructeurs mettent en évidence (élicitent) à travers des études de marché. Ces études permettent de définir d'une part des modèles d'usage des véhicules et de définir les exigences applicables à un véhicule hybride.

7.2.1. Modèles d'usage

Nous désignons par modèles d'usage des configurations définies des grands cycles d'utilisation par rapport auxquels les constructeurs automobiles évaluent les performances de leurs véhicules en matière de performance, de consommation, de pollution etc. Ces évaluations peuvent être officielles ou au contraire privées.

Le plus familier de ces cycles est probablement « le cycle 93/116/CE » du nom de la Directive Européenne [CE-93/116] qui le spécifie et par rapport à laquelle les constructeurs européens qualifient la performance consommation des véhicules qu'ils mettent en circulation. Toutefois, le cycle 93/116/CE n'est pas représentatif des multiples usages qui peuvent être fait d'un véhicule particulier. On comprend donc, qu'à côté de la 93/116/CE, de très nombreux cycles d'utilisation aient vu le jour dans différents pays.

⁴¹

On aurait également pu penser à un volant d'inertie

Il serait évidemment illusoire de vouloir procéder à un recensement (mais aussi de peu d'intérêt) de ces cycles à travers le monde, aussi nous contenterons nous d'en présenter un, développé par l'Agence US pour la Protection de l'Environnement (EPA). Il s'agit du Federal Test Procedure, qui représente une succession de trois cycles (un cycle moteur froid, un cycle intermédiaire et un cycle moteur chaud).

D'autres cycles auraient pu être évoqués comme le New York City Cycle (NYCC) qui reflète un trafic à basse vitesse avec de nombreux arrêts et redémarrages (stop-and-go traffic conditions) ou encore le US06 qui reflète un trafic avec des accélérations vives.

La vitesse est exprimée en miles par heure. Chacun de ces cycles traduit des conditions particulières d'utilisation d'un véhicule (un environnement et un style de conduite). Dans ces conditions, un modèle d'usage est un « cocktail » particulier d'un ensemble de cycles.

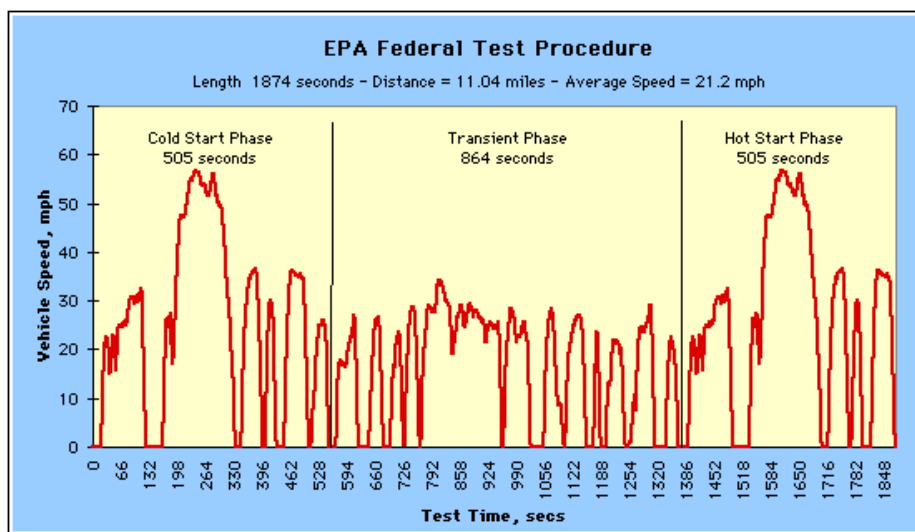


Figure 7.5. Cycle FTP (Federal Test Procedure).

7.2.2. Exigences opérationnelles pour un véhicule hybride

Dès lors le noyau dur de la spécification opérationnelle d'un véhicule hybride se présente, selon nous, comme un système d'exigences incluant deux groupes d'exigences :

- Exigences générales du segment de marché auquel appartient le véhicule hybride
- Exigences spécifiques liées à l'hybridation.

Nous rappelons que nous avons défini une exigence comme une prescription de la forme « Condition => val(P) = D » i.e. « si la Condition est réalisée alors les valeurs de P devront être dans le domaine D » (6.1.2, La synthèse des exigences).

Par exemple, l'exigence Cycle = NYCC => Conso \leq 100g appliquée à un véhicule hybride donné signifie sur « sur le cycle New York City Cycle, la consommation de ce véhicule ne devra pas excéder 100 g de CO₂ ».

7.2.2.1. Exigences générales pour un véhicule hybride

Si la motorisation d'un véhicule particulier est une caractéristique (on pourrait dire fonction automobile) importante de ce dernier, elle ne peut cependant pas être prise comme le tout, un véhicule particulier assure bien d'autres fonctions.

La segmentation du marché des véhicules particuliers est en Europe une donnée assez stable [SUB 99]. Ainsi la « society of Motor Manufacturers and Traders » (SMMT) utilise une segmentation en neuf segments de marché⁴² :

| | | |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| #A segment-mini | #D segment-upper-medium | #G segment-sports |
| #B segment-small | #E segment-executive | #H segment-dual-purpose |
| #C segment-lower-medium | #F segment-luxury | #I segment-multi-purpose vehicle |

Tableau 7.1. Segmentation du marché des véhicules particuliers

Chaque segment regroupe des véhicules, produits et vendus par les différents constructeurs et présentant des caractéristiques relativement homogènes (la longueur du véhicule, par exemple) et comparables. Chaque segment s'adresse également à un secteur de clients ayant des comportements [ANU 99], des attentes et des moyens relativement homogènes et comparables.

Les professionnels supposent qu'un consommateur comparera et hésitera entre deux véhicules du même segment. Les constructeurs sont très attentifs au placement (par rapport à la concurrence) de leurs véhicules dans le segment dans lequel ils se situent. Ainsi, en France, portent-ils une attention toute particulière au segment M1 correspondant du « #C segment-lower-medium » anglo saxon, qui est le segment de référence en France puisqu'il représente ici près de 38 % des immatriculations.

Evidemment cette catégorisation en segments, qui est à la fois une catégorisation opérationnelle et économique, manipulée par les constructeurs et les administrations, n'est pas figée une fois pour toutes, elle évolue dans le temps en fonction d'une part des innovations proposées par les constructeurs, comme l'installation dans le paysage des monospaces et des modifications des attentes des consommateurs comme la forte demande concernant les 4x4 (SUV).

Dès lors, si un constructeur envisage de commercialiser un véhicule hybride dans un segment donné « S », les performances de ce véhicule concernant ses propriétés devront être dans la cible des véhicules du segment « S ». Ainsi, par exemple, le comportement routier, la stabilité, l'habitabilité, le confort, la vie à bord, l'autonomie, l'ergonomie du poste de conduite, la disponibilité d'un hybride du segment « S » devra donc être dans la cible de ce segment.

Dans ce contexte, l'interface de commande du véhicule devra être équivalente à celui d'un véhicule conventionnel équipé d'une boîte automatique (pédales de frein et d'accélérateur, levier de boîte PRND), tandis que l'interface de visualisation présentera des spécificités liées à l'hybridation.

On peut même inclure dans ce groupe d'exigences, les performances de dynamique longitudinale, à savoir l'efficacité des freinages, le brio des accélérations, la continuité du couple transmis lors des changements de démultiplications alors même que ces prestations sont très directement allouées à la chaîne de traction.

⁴² Nous utilisons en France une segmentation légèrement différente (A, B, M1, M2, M3, H) mais assez comparable.

7.2.2.2. Exigences spécifiques liées à l'hybridation

Les exigences spécifiques liées à l'hybridation vont, quant à elles, concerner les émissions de CO₂, la consommation de carburant et les coûts.

- En ce qui concerne les émissions de CO₂ et la consommation de carburant, on attend d'un véhicule hybride qu'il fasse la différence par rapport aux véhicules conventionnels du même segment, c'est là sa justification socio-économique.

Cette exigence peut sommairement être formalisée par une séquence d'exigences de la forme « Cycle = 'cycle_i' => Consommation (HEV) ≤ x_i g CO₂ » c'est-à-dire « sur un cycle 'cycle_i', la consommation du véhicule hybride par devra être supérieure à x g CO₂ » où 'cycle_i' appartient à une famille définie de cycles d'utilisation.

L'agrégation de ces exigences entraîne la formulation implicite d'une exigence conséquence de la forme « Durée = Année Fiscale & Usage = 'u' => Consommation-annuelle (HEV) = X g CO₂ » où 'u' est une agrégation particulière de cycles d'utilisation représentatifs de l'usage fait du véhicule.

- Dans le même temps, le bilan économique doit être acceptable pour l'acquéreur potentiel.

Cette dernière exigence peut s'exprimer de la manière suivante : « Amortissement & Usage = 'u' => TOC (HEV) – TOC (VRef) ≤ A », c'est-à-dire « sur une période d'amortissement (5 ans par exemple), et pour une utilisation déterminée, le surcoût de possession du véhicule hybride par rapport au coût du véhicule conventionnel de référence devra être inférieur au montant A (positif ou négatif) ».

Ainsi l'exigence « Amortissement => TOC (HEV) – TOC (VRef) ≤ A » peut être dérivée en trois sous exigences :

L'élaboration de ces exigences fait (ou devrait faire) l'objet d'un processus de décisions justifiées (Requirement Rationale) similaire à celui que nous avons exposé dans la section 6.2.5, et dont les arguments (6.2.5.2.3) sont notamment fondés sur des études de marché, par exemple l'étude déjà citée [EPRI 00]].

Le système que forme les exigences opérationnelles fait ensuite l'objet d'un processus de dérivation (6.1.2.4, Relations entre exigences) et d'allocation (6.1.2.5, Relations entre exigences et objets cibles) parallèle du processus de conception du système.

Ainsi l'exigence « Amortissement => TOC (HEV) – TOC (VRef) ≤ A » peut être dérivée en trois sous exigences :

- « Cout-Acquisition (HEV) – Cout-Acquisition (VRef) ≤ A_i »
- « Durée = Année Fiscale & Usage = 'u' => Cout-Moyen-Opération (HEV) – Cout-Moyen-Opération (VRef) ≤ A_o »
- « Durée = Année Fiscale & Usage = 'u' => Cout-Moyen-Maintenance (HEV) – Cout-Moyen-Maintenance (VRef) ≤ A_m »

Ces trois exigences dérivées qui résultent de l'allocation de l'exigence mère à trois phases du cycle de vie du HEV (acquisition, opération, maintenance) devront alors respecter la relation suivante : $A_i + \text{Amortissement} * (A_o + A_m) = A$.

On notera que la seconde exigence c'est-à-dire « Durée = Année Fiscale & Usage = 'u' => Cout-Moyen-Opération (HEV) – Cout-Moyen-Opération (VRef) ≤ A_o » est en relation avec l'exigence implicite que nous avons formulée précédemment « Durée = Année Fiscale & Usage = 'u' => Consommation-annuelle (HEV) = X g CO₂ ».

Ces deux exigences peuvent être compatibles, elles peuvent inversement être contradictoires (6.1.2, La synthèse des exigences).

La mise en évidence des relations existantes entre exigences montre que nous avons bien affaire à un système abstrait (5.1.3, Systèmes conceptuels) d'exigences et non à une simple liste d'exigences indépendantes.

7.3. Conception de systèmes de chaînes de traction hybrides

Comme nous pouvons le remarquer, l'expression des exigences opérationnelles appliquées à un véhicule hybride est neutre par rapport au concept technologique envisagé. Elle ne contient aucune référence explicite au fait que la voie choisie soit celle de l'hybride électrique. Le même « cahier des charges » pourrait valoir pour d'autres véhicules exploitants des voies technologiques différentes.

D'ailleurs, des initiatives globales telles que « The FreedomCAR and Fuel Partnership » aux Etats-Unis (en remplacement du PNGV « Partnership for New Generation of Vehicles ») ou leurs équivalents européen [EUCAR 2003] et français explorent en parallèle différentes voies incluant les biocarburants, l'hybride, la pile à combustible, illustrant d'abord le caractère contingent de ces recherches (6.2.1), à savoir que de toutes ces pistes, aucune, une, plusieurs peuvent aboutir et le fait qu'il est, pour le moment, bien difficile de faire un pronostic.

Par ailleurs, le mode d'investigation est un mode d'investigation où plusieurs alternatives sont examinées en parallèle, comme nous avons pu le décrire dans la section 6.2.5 de notre travail. Il peut être également rapproché d'une phase de divergence telle que les décrivent Roozenburg et Eekels dans leur ouvrage fondamental [ROO 95].

Le processus de conception d'un système ou d'un produit débute donc par un pari sur l'avenir. Nous faisons le pari que l'hybridation électrique d'une chaîne de traction thermique conventionnelle peut permettre de répondre aux exigences opérationnelles présentées ci-dessus (7.2.2, Exigences opérationnelles pour un véhicule hybride).

7.3.1. Chaînes « fonctionnelles » et Modes

Dans cette section, nous mettons en œuvre des ressources méthodologiques développées aux paragraphes 6.1.3.1.1 et 6.1.3.1.2.

Comme indiqué ci-dessus, nous nous proposons d'introduire dans la chaîne de traction d'un véhicule particulier conventionnel une source d'énergie électrique et un processeur électrique fonctionnant à partir de cette source pour :

- Attendu A : Permettre au moteur thermique de fonctionner dans ses plages de rendement optimal,
- Attendu B : Arrêter le moteur thermique chaque fois que le véhicule est à l'arrêt dans le trafic ou encore s'il circule à basse vitesse,
- Attendu C : Récupérer l'énergie cinétique du véhicule lorsque celui-ci est en phase de décélération pour pouvoir la réutiliser ultérieurement.

L'attendu B « Arrêter le moteur thermique chaque fois que le véhicule est à l'arrêt dans le trafic ou encore s'il circule à basse vitesse » suggère la mise en place d'une chaîne de transformations constituée d'une source électrique, d'une conversion de puissance électrique en puissance mécanique. La chaîne de traction fonctionne dans ces situations en mode « **traction électrique** ».

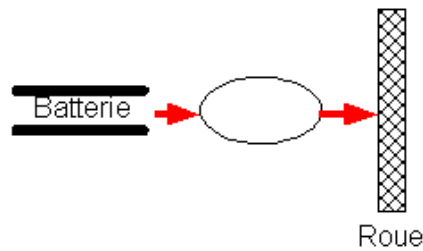


Figure 7.6. Mode Traction Electrique.

Il ne s'agit ici que d'un schéma de principe très sommaire puisque des transformations supplémentaires doivent être insérées dans la chaîne.

En amont de la conversion puissance de électrique en puissance mécanique, la puissance électrique doit être transporté au processeur de la conversion puissance de électrique en puissance mécanique (moteur électrique). Cette puissance électrique débitée par une batterie (courant continu) peut également nécessiter une adaptation au moteur électrique s'il s'agit d'une machine à courant alternatif.

De même en aval de la conversion puissance de électrique en puissance mécanique, le régime de la machine électrique doit être adaptée aux régimes des roues motrices tandis la puissance mécanique produite doit être amenées aux roues.

Ceci nous amène à compléter la chaîne « fonctionnelle » précédente.

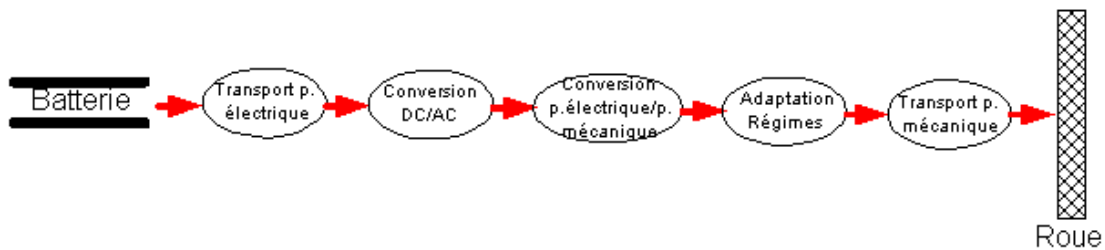


Figure 7.7. Chaîne de Traction Electrique.

L'attendu C « Récupérer l'énergie cinétique du véhicule lorsque celui-ci est en phase de décélération pour pouvoir la réutiliser ultérieurement » peut alors être assuré par la chaîne de transformation inverse. La chaîne de traction fonctionne alors en mode « freinage récupératif ».

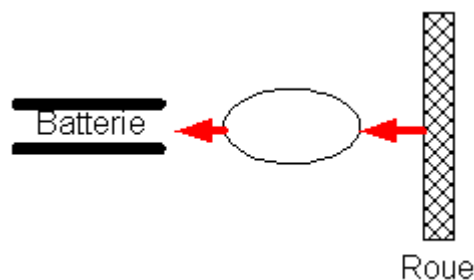


Figure 7.8. Mode Freinage Récupératif.

De la même manière que ci-dessus, cette chaîne est également précisée.

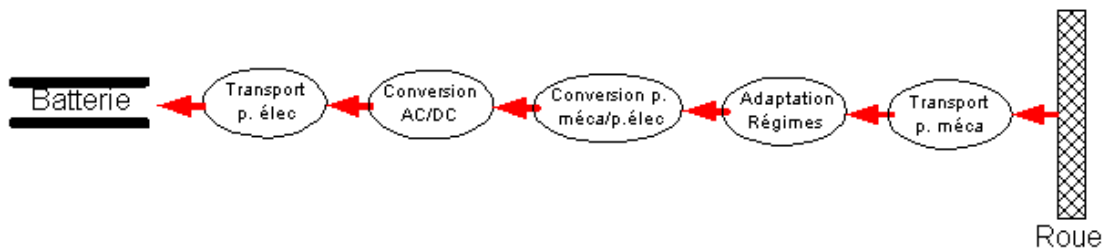


Figure 7.9. Chaîne de Freinage Récupératif.

L'attendu A « Permettre au moteur thermique de fonctionner dans ses plages de rendement optimal » place alors le moteur thermique dans l'une des trois situations suivantes :

- En fonctionnement optimal ($\omega, C_{opti}(\omega)$), la puissance fournie par le moteur thermique correspond exactement à la puissance appelée à la roue. La chaîne de traction fonctionne alors en mode « **traction thermique** ».



Figure 7.9. Mode Traction Thermique

Pour les figures 7.9 à 7.12, la nature du flux sortant de la chaîne de transformations n'est pas précisée. Il peut s'agir d'un flux de puissance mécanique mais il peut également s'agir d'un flux de puissance électrique. Dans ce dernier cas, la chaîne de transformation s'achève par conversion électrique/mécanique.

- En fonctionnement optimal ($\omega, C_{opti}(\omega)$), la puissance fournie par le moteur thermique est inférieure à la puissance appelée à la roue, un complément doit être fourni par la chaîne électrique. La chaîne de traction fonctionne alors en mode « **traction hybride** ».

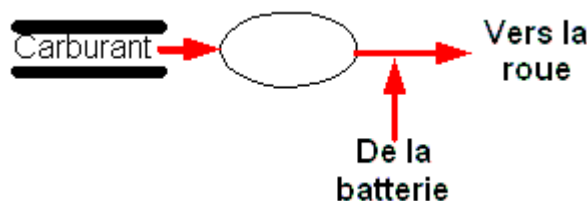


Figure 7.10. Mode Traction Hybride.

- En fonctionnement optimal ($\omega, C_{opti}(\omega)$), la puissance fournie par le moteur thermique est supérieure à la puissance appelée à la roue, une fraction de la puissance peut être dirigée vers la batterie. La chaîne de traction fonctionne alors en mode « **traction thermique recharge batterie** ».

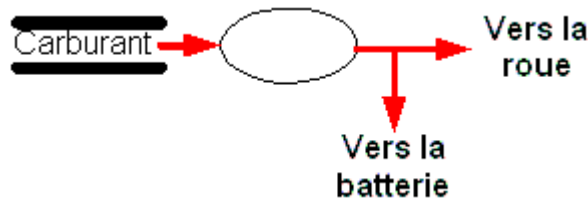


Figure 7.11. Mode Traction Thermique Recharge Batterie.

La conception ci-dessus (qui illustre la section 6.1.3.1.1, Concevoir les modes de fonctionnement) permet d'isoler cinq modes de fonctionnement de la chaîne de traction auxquels il convient d'ajouter un sixième permettant de restaurer le potentiel électrique, il s'agit du mode « **Recharge batterie à l'arrêt** » :

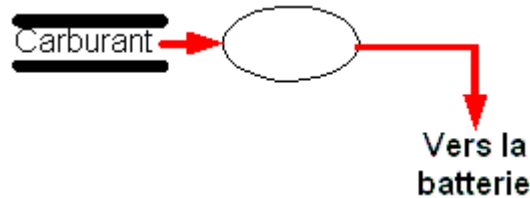


Figure 7.12. Mode Recharge Batterie à l'arrêt.

7.3.2. Architectures série et parallèle

Dans cette section, nous mettons en œuvre des ressources méthodologiques développées au paragraphe 6.1.3.1.3.

Dans les développements ci-dessus, nous n'avons pas précisé où se trouve le point de jonction des deux compartiments (électrique et thermique) ni la nature des flux qui y convergent (électrique ou mécanique).

La jonction peut s'opérer soit avant la transformation (électrique -> mécanique) soit après cette transformation.

- Dans le premier cas, les flux additionnés sont électriques, et nous avons affaire à un hybride série ou SHEV.

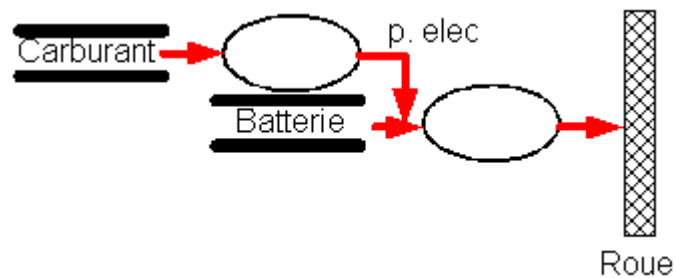


Figure 7.13. Hybride série.

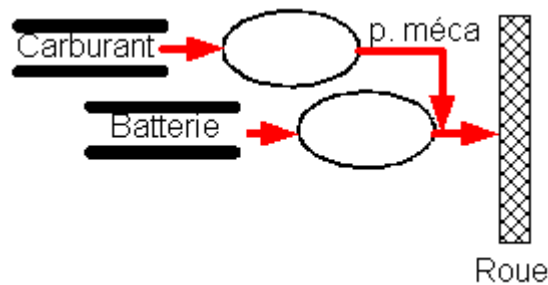


Figure 7.14. Hybride parallèle.

- Dans le second cas, les flux additionnés sont mécaniques, et nous avons affaire à un hybride parallèle ou PHEV.

On peut également dire que le SHEV additionne des courants (électriques) tandis que le PHEV additionne des couples (mécaniques).

Par conséquent, une variante dans l'intégration des chaînes de transformation (6.1.3.1.3, Intégrer les chaînes de transformations) va engendrer deux familles distinctes d'hybrides électriques. Ce qui distingue l'hybride série et l'hybride parallèle est une modification dans la façon d'intégrer les chaînes de transformation (différence de conception fonctionnelle).

7.3.2.1. Véhicule hybride série (SHEV)

Dans cette option architecturale, la chaîne de traction est constituée de deux compartiments en série :

- Un compartiment électrique formé d'une réserve de puissance électrique et d'un moteur électrique de traction capable de transformer la puissance électrique de la réserve en puissance à la roue et inversement en freinage de prélever de la puissance à la roue pour reconstituer la réserve de puissance électrique.
- Un compartiment thermique formé d'un moteur à combustion interne et d'un alternateur capable de fournir une puissance électrique au moteur électrique de traction et à la réserve électrique. Le moteur thermique peut alors être mis en œuvre de façon à optimiser son rendement. Le compartiment thermique fonctionne comme un groupe électrogène

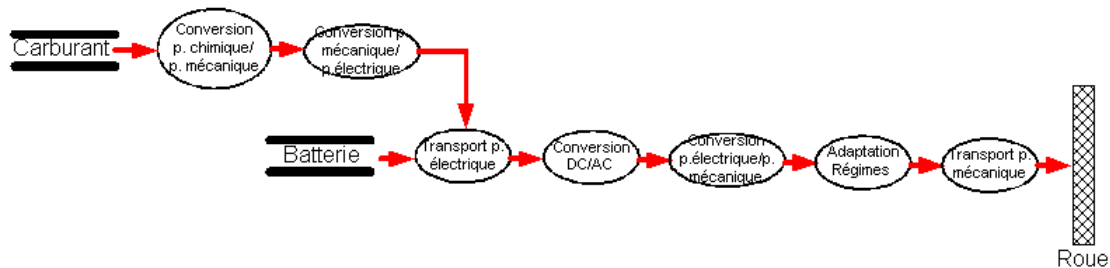


Figure 7.15. Schéma d'une chaîne de traction hybride série.

7.3.2.2. Véhicule hybride parallèle (PHEV)

Dans cette option architecturale, la chaîne de traction est constituée de deux compartiments en parallèle :

- Un compartiment électrique formé d'une réserve de puissance électrique et d'un moteur électrique de traction capable de transformer la puissance électrique de la réserve en puissance à la roue et inversement en freinage de prélever de la puissance à la roue pour reconstituer la réserve de puissance électrique.
- Un compartiment thermique formé d'un moteur à combustion interne et d'un alternateur capable de fournir une puissance électrique au moteur électrique de traction et à la réserve électrique. Le moteur thermique peut alors être mis en œuvre de façon à optimiser son rendement.

Le point de jonction des deux compartiments s'effectue en aval de la conversion électrique/mécanique du compartiment électrique et les flux additionnés sont des flux mécaniques.

7.3.3. Architectures parallèle simple et double arbres

Cette jonction nous ouvre à nouveau des degrés de liberté et de nouvelles possibilités architecturales : la jonction peut s'opérer avant ou après l'adaptation des régimes donnant naissance à deux nouveaux types d'architecture hybride parallèle :

- Un jonction avant adaptation des régimes ou architecture hybride parallèle simple arbre.

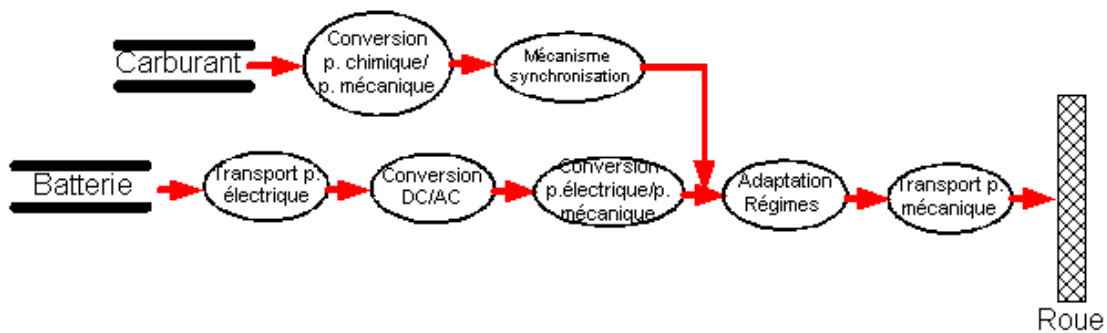


Figure 7.16. Schéma d'une chaîne de traction hybride parallèle (simple arbre).

- Un jonction après adaptation des régimes ou architecture hybride parallèle double arbre.

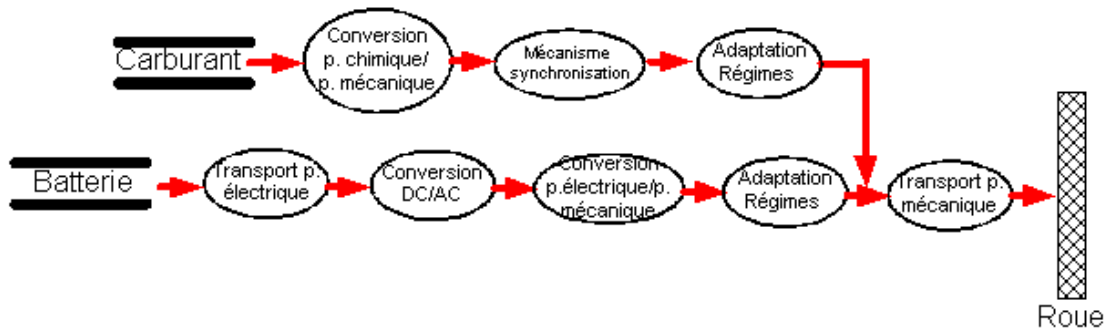


Figure 7.17. Schéma d'une chaîne de traction hybride parallèle (double arbre).

7.3.4. Commutation des modes

Le passage d'un mode de fonctionnement à un autre suppose une commutation de mode qui n'est rien d'autre que la réalisation d'une fonction technique. Ainsi le passage du mode électrique au mode hybride implique de « démarrer le moteur thermique » tandis que la commutation inverse implique d'« arrêter le moteur thermique ».

L'identification des modes réalisée ci-dessus a mis en évidence six modes de fonctionnement d'une chaîne de traction hybride auxquels il faut ajouter un mode Arrêt de la chaîne qui correspond à l'absence de flux: Traction électrique, Traction thermique, Traction thermique recharge batterie, Traction hybride, Freinage récupératif, Recharge batterie à l'arrêt.

Nous pouvons alors compléter l'ensemble des commutations théoriquement possibles.

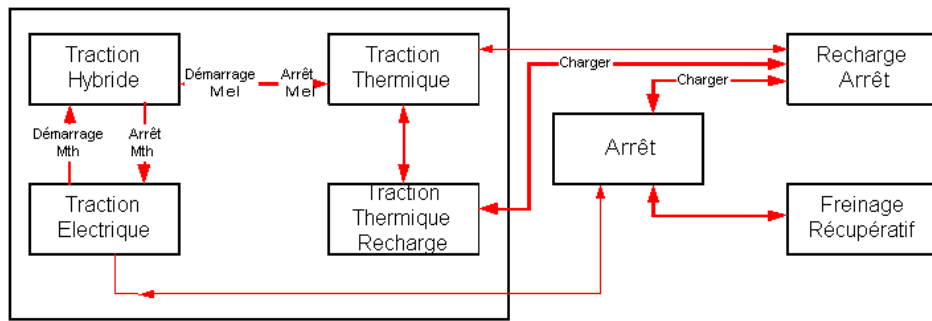


Figure 7.18. Commutations de modes

7.3.5. Dimensionnement fonctionnel

Le dimensionnement fonctionnel consiste en la détermination des performances des transformations des différentes chaînes, en d'autres termes la détermination des exigences fonctionnelles appliquées aux constituants des différentes chaînes.

Une chaîne de traction, qu'elle soit classique, électrique ou encore hybride, doit être capable de vaincre les forces qui s'opposent à l'avancement du véhicule qu'elle motorise.

Pour cela, une chaîne de traction doit être en mesure de fournir un couple aux roues motrices, C_{roue} , lié aux caractéristiques de véhicule par la relation suivante

$$C_{roue} = M_{vhl} * R_{roue} * (\gamma_{vhl} + g * \sin(\alpha_r)) + \left(\frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{vhl}^2 * R_{roue}\right) + (f_{roll} * M_{vhl} * g * R_{roue}) \quad ([ARQ \ 99], \text{ 255 et suivantes pages ou encore [BOS 00], pages 338 et suivantes}).$$

Dans cette équation, C_{roue} représente le couple à fournir aux roues pour imprimer une accélération γ_{vhl} à un véhicule de masse M_{vhl} , et animé d'une vitesse v_{vhl} , dont la surface frontale est A , le coefficient de pénétration dans l'air (de masse volumique ρ) et noté C_d et dont les roues ont un rayon R_{roue} et un coefficient de résistance au roulement f_{roll} sur une chaussée dont l'angle de pente est α_r .

Ou encore, la chaîne de traction d'un véhicule VHL doit fournir une puissance P_{roue} aux roues motrices lié aux paramètres véhicule par la relation suivante :

$$P_{roue} = C_{roue} * \omega_{roue} = M_{vhl} * v_{vhl} * (\gamma_{vhl} + g * \sin(\alpha_r)) + \left(\frac{1}{2} * \rho * c_d * A * v_{vhl}^3\right) + (f_{roll} * M_{vhl} * g * v_{vhl})$$

D'autre part, pour fournir ce couple de traction aux roues motrices, la chaîne de traction doit transmettre un couple moteur produit par un exemple par un moteur à combustion interne (C_{mth}) ou encore par un moteur électrique (C_{mel}).

En supposant que le régime des roues soit ω_{roue} , pour pouvoir fournir une puissance Proue aux roues motrices, un moteur thermique doit fournir un couple C_{mth} tel que :

$$P_{roue} = C_{roue} * \omega_{roue} = \eta * k_B * k_P * C_{mth} * \omega_{roue} - (k_B^2 * k_P^2 * I_{MB} + k_P^2 * I_{BP} + I_{PR}) * \frac{d\omega_{roue}}{dt} * \omega_{roue}$$

où η , k_B , k_P , I_{MB} ,

I_{BP} et I_{PR} représentent respectivement

- le rendement de transmission (qui rend compte des pertes mécaniques au niveau de la boîte et du pont),
- les rapports de démultiplication entre l'arbre de sortie moteur et l'arbre de sortie de boîte de vitesse (rapport de boîte) d'une part et entre l'arbre de sortie de boîte de vitesse et l'arbre de roue (rapport de pont) d'autre part,
- les moments d'inertie de (1) l'ensemble équipement mobile, embrayage, arbre primaire de boîte, (2) l'ensemble arbre secondaire de boîte, arbre primaire de pont, (3) l'ensemble arbre secondaire de pont, arbre de roue.

Dans cette représentation nous supposons que l'embrayage est fermé et sans glissement et que les arbres sont de raideur infinie (par d'oscillations).

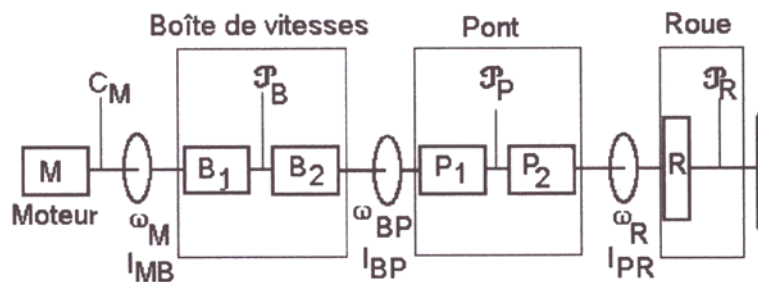


Figure 7.19. Inerties d'une chaîne de traction (tiré de [ARQ 99], page 256)

Un moteur électrique doit fournir un couple C_{mel} tel que :

$$P_{roue} = C_{roue} * \omega_{roue} = \eta * k_B * k_P * C_{mel} * \omega_{roue} - (k_B^2 * k_P^2 * I_{MB} + k_P^2 * I_{BP} + I_{PR}) * \frac{d\omega_{roue}}{dt} * \omega_{roue}$$

où η , k_B , k_P ,

I_{MB} , I_{BP} et I_{PR} représentent respectivement

- le rendement de transmission,
- les rapports de démultiplication entre l'arbre de sortie moteur et l'arbre de sortie de boîte de vitesse (rapport de boîte) d'une part et entre l'arbre de sortie de boîte de vitesse et l'arbre de roue (rapport de pont) d'autre part,
- les moments d'inertie de (1) l'ensemble rotor, arbre primaire de boîte, (2) l'ensemble arbre secondaire de boîte, arbre primaire de pont, (3) l'ensemble arbre secondaire de pont, arbre de roue.

Pour simplifier légèrement ces formules, il peut être intéressant de rappeler que

$$v_{VHL} = R_{roue} * \omega_{roue} \quad \text{et que} \quad \gamma_{VHL} = R_{roue} * \frac{d\omega_{roue}}{dt}$$

$$P_{roue} = \eta * k_B * k_P * C_{mel} * \frac{V_{VHL}}{R_{roue}} - (k_B^2 * k_P^2 * I_{MB} + k_P^2 * I_{BP} + I_{PR}) * \frac{\gamma_{VHL} * V_{VHL}}{R_{roue}^2}$$

Il vient alors

En « hybridant » ces deux équations, nous pouvons alors exprimer la puissance à fournir à la roue en fonction des couples fournis par le moteur thermique et la machine électrique de traction d'une chaîne hybride parallèle selon les deux modalités (simple arbre et double arbre).

7.3.5.1. Architecture simple arbre

L'arborescence-produit d'une chaîne de traction hybride parallèle simple arbre peut être représentée schématiquement de la manière suivante :

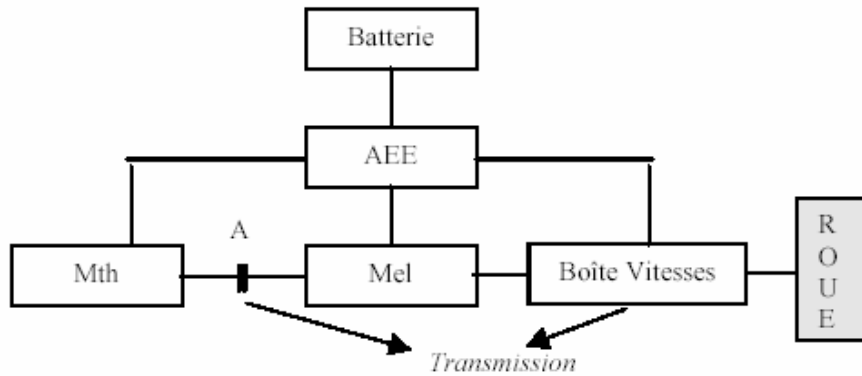


Figure 7.20. Arborescence produit simple arbre

Un réseau électrique et un convertisseur AC/DC (AEE) permettent de relier une batterie de puissance aux différents constituants de la chaîne de traction.

Les liaisons principales sont les suivantes :

- La machine électrique (Mel) et la boîte de vitesses (BV) sont liées de manière permanente,
- Le moteur thermique (Mth) et la Mel sont liés par l'intermédiaire d'un système d'accouplement (A).

La puissance fournie à la roue par cette chaîne est alors définie par l'équation suivante

$$P_{roue} = \eta * k_B * k_P * (C_{mth} + C_{mel}) * \frac{V_{VHL}}{R_{roue}} - (k_B^2 * k_P^2 * I_{MB} + k_P^2 * I_{BP} + I_{PR}) * \frac{\gamma_{VHL} * V_{VHL}}{R_{roue}^2}$$

lorsque la chaîne de traction est en mode « traction hybride » ou en mode « traction thermique » ou encore en mode « traction thermique recharge batterie ». Le couple C_{mel} est positif (moteur) dans le premier cas, nul dans le second et négatif dans le troisième (générateur). I_{MMB} représente alors le moment d'inertie de l'ensemble équipement mobile, embrayage, rotor de la machine électrique arbre primaire de boîte.

Lorsque la chaîne de traction est en mode « traction électrique » la puissance fournie à la roue par cette chaîne est alors définie par l'équation suivante

$$P_{roue} = \eta * k_B * k_P * (C_{mth} + C_{mel}) * \frac{V_{VHL}}{R_{roue}} - (k_B^2 * k_P^2 * I_{MELB} + k_P^2 * I_{BP} + I_{PR}) * \frac{\gamma_{VHL} * V_{VHL}}{R_{roue}^2}$$

Ici, C_{mth} est nul et I_{MELB} correspond alors le moment d'inertie de l'ensemble rotor de la machine électrique arbre primaire de boîte.

7.3.5.2. Architecture double arbre

L'arborescence produit d'une chaîne de traction hybride parallèle double arbre peut être représentée schématiquement de la manière suivante :

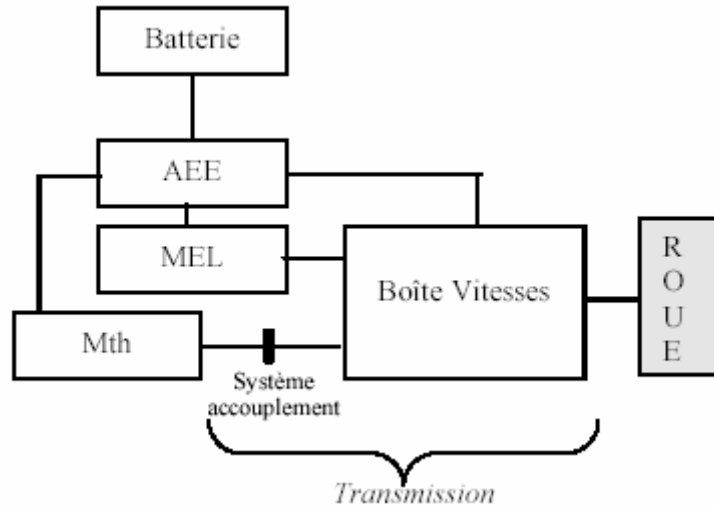


Figure 7.21. Arborescence produit double arbre

La transmission présente ici une particularité par rapport à une transmission classique : Dans la mesure où l'addition des couples s'effectue après l'adaptation des régimes, la transmissions possèdent deux arbres primaires (arbre thermique et arbre électrique) et un arbre de sortie (arbre pont). On a affaire en réalité à deux boîtes de vitesses, une électrique et une thermique qui converge sur le même arbre de sortie.

La puissance fournie à la roue par cette chaîne est alors définie par l'équation suivante :

$$P_{roue} = (\eta_{therm} * k_{therm} * C_{mth} + \eta_{elec} * k_{elec} * C_{mel}) * k_p * \frac{v_{VHL}}{R_{roue}} - \left[(k_{therm}^2 * k_p^2 * I_{MTHB} + k_{elec}^2 * k_p^2 * I_{MELB}) + k_p^2 * I_{BP} + I_{PR} \right] * \frac{\gamma_{VHL} * v_{VHL}}{R_{roue}^2}$$

7.3.5.3. Dimensionnement de la transmission et des moteurs

Les relations, présentées ci-dessus, concernant les différentes architectures envisagée forment des théories spécifiques (5.1.3.2, Théories et théories spécifiques) permettant (1) de construire des modèles de simulation (5.1.3.3, Modèles de simulation) de différentes sortes de chaîne de traction, (2) d'observer le comportement dynamique de celle-ci en fonction de différents choix de conception et (3) d'évaluer le coût de ces différents choix en terme de puissance mécanique à produire par les moteurs électrique et thermique pour obtenir un comportement dynamique longitudinal satisfaisant une partie des exigences opérationnels du véhicule.

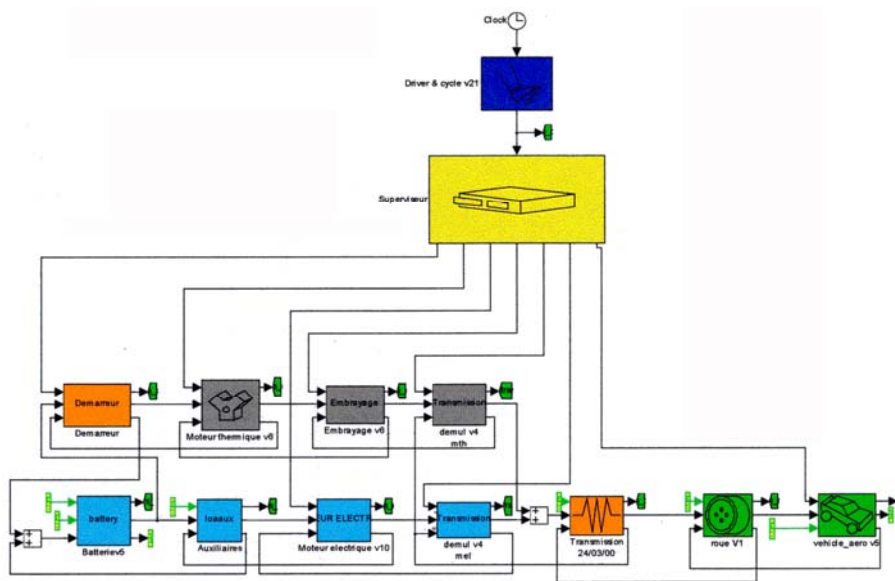


Figure 7.22. Modèle de simulation d'un véhicule hybride parallèle double arbre

Les choix de conception évoqués ci-dessus concernent (1) le nombre de rapports de démultiplication de la transmission, (2) le placement relatif de ces rapports, (3) les inerties cibles des différents constituants de la chaîne de traction et (4) les domaines de fonctionnement cibles (régime, couple) des différents moteurs de la chaîne.

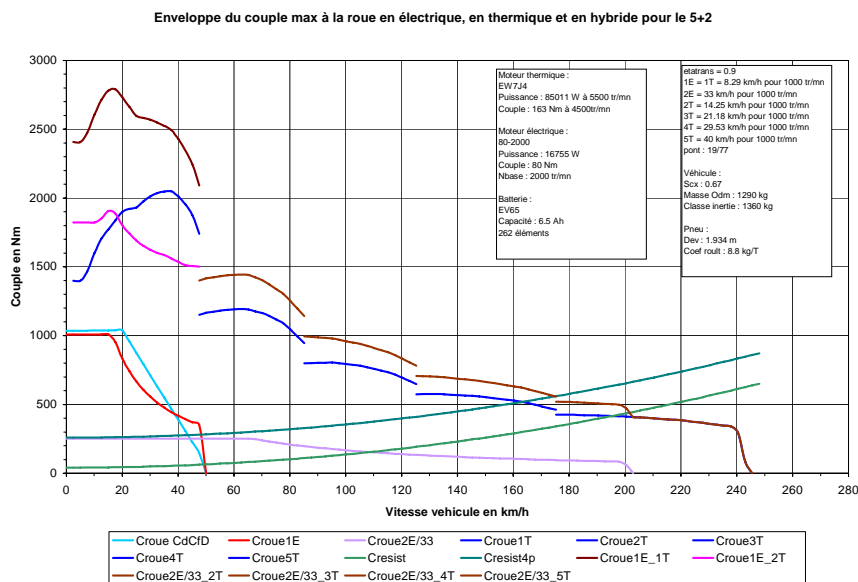


Figure 7.23. Etude par simulation de l'étagement des rapports d'une transmission double arbre

Parmi les choix possibles, l'utilisation d'une transmission à variation continue (CVT) au lieu d'une boîte de vitesses à rapports discrets constitue une alternative d'architecture envisageable. C'est

notamment le choix effectué Toyota pour le véhicule hybride qu'il commercialise depuis plusieurs années.

Bouclé par des modèles thermodynamiques, électriques et électrochimiques du moteur thermique, de la machine électrique et de la batterie de puissance, ces modèles de simulations permettent ensuite (1) de réaliser des bilans énergétiques de la chaîne suivants parcours et (2) de pré dimensionner fonctionnellement d'autres constituants tels que la batterie, le réseau électrique ainsi que l'électronique de puissance (convertisseur AC/DC).

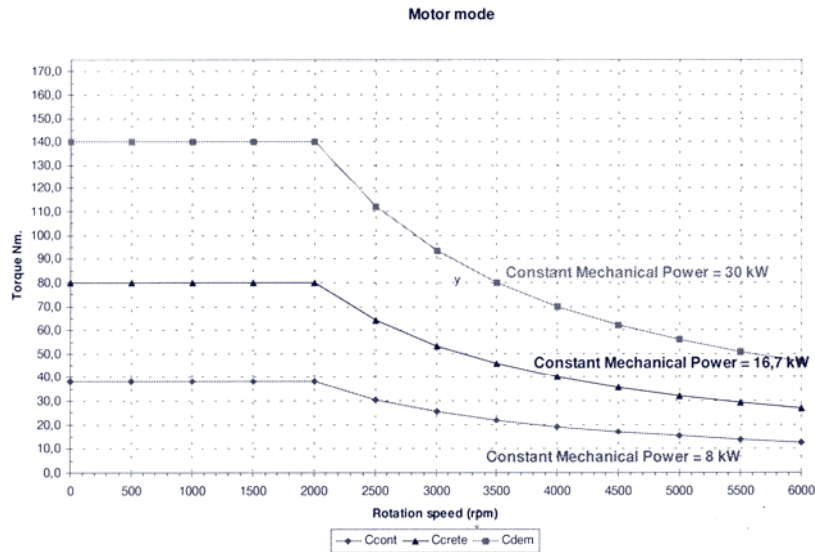


Figure 7.24. Couple moteur requis de la machine électrique

Ce pré dimensionnement doit être complété par un dimensionnement fin correspondant aux commutations de modes. Par exemple, la commutation du mode traction électrique au mode traction hybride. Cette dernière commutation correspond au démarrage du moteur thermique par la machine électrique alors que celle-ci est en train de tracter le véhicule.

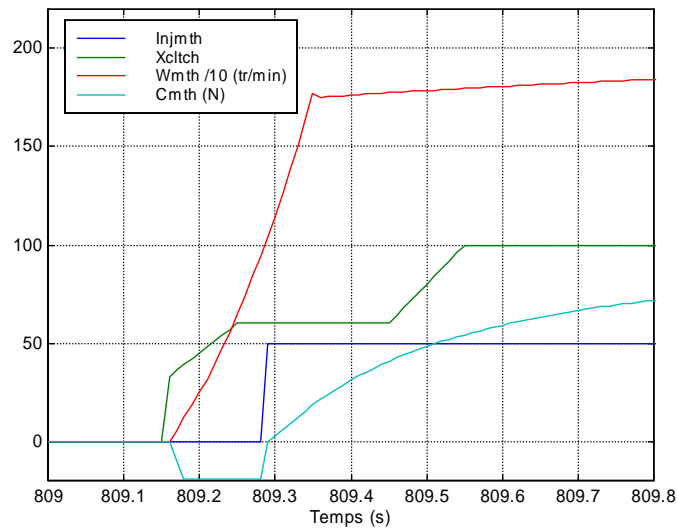


Figure 7.25. Prélèvement de couple sur la transmission lors du démarrage du moteur thermique

Elle requiert donc un surdimensionnement de la machine électrique. La machine électrique doit être capable de produire un surcroît de puissance mécanique pendant plusieurs secondes pour démarrer le moteur thermique et ceci sans affecter la dynamique longitudinale (affaissement de l'accélération du véhicule).

Un redimensionnement analogue d'un des moteurs (thermique ou électrique) peut s'imposer lors des autres changements de modes (passage de traction thermique à traction thermique recharge batterie) ou au sein d'un même mode lorsque qu'une commutation apparaît au sein d'un sous système (changement de rapport de boîte, par exemple).

Ainsi un changement de rapport de boîte (à rapports discrets) correspond à une commutation de mode du sous système « transmission ». La réalisation d'un changement de rapports nécessite une synchronisation des arbres de boîtes. Cette synchronisation est généralement assurée par des synchroniseurs dans les chaînes de traction conventionnelle compte tenu de la faible inertie de l'arbre primaire de boîte lorsque l'embrayage est ouvert.

Pour certaines architectures hybrides (parallèle simple arbre), la machine électrique est solidaire de l'arbre primaire de boîte. L'inertie de l'ensemble embrayage-rotor-arbre primaire de boîte n'autorise plus une synchronisation par synchroniseurs. Cette fonction technique de synchronisation alors doit être allouée (3.1.2.3 – 3 Allocation) autrement et la machine électrique est alors candidate.

Cette allocation peut conduire à redimensionner la puissance crête de la machine électrique pour assurer de temps de synchronisation satisfaisants lors des changements de rapport et garantir un confort dans la dynamique longitudinale lors de ces changements de modes de la transmission (suppression de l'effacement de couple).

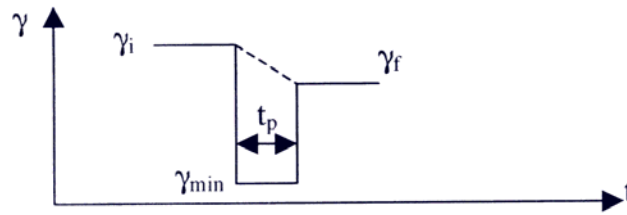


Figure 7.26. Temps de passage d'un rapport et confort longitudinal

A moins que l'introduction d'une variante d'architecture ne modifie la donne. Ainsi, l'insertion d'un second embrayage, cette fois ci entre le rotor de la machine électrique et l'arbre primaire de boîte, comme cela est illustré sur la figure permet de remettre en selle une synchronisation par synchroniseurs.

Cette variante, dérivée de l'alternative Simple Arbre présentée ci-dessus, introduit dans son schéma de principe un système d'accouplement B permettant d'accoupler ou d'isoler la machine électrique et la boîte de vitesses alors qu'elles sont liées de manière permanente dans la version de base. Elle a en revanche l'inconvénient d'introduire sous capot un constituant supplémentaire.

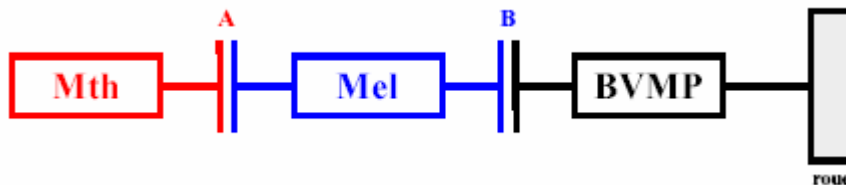


Figure 7.27. Variante architecturale de l'hybride parallèle simple arbre double embrayage

7.3.6. Système de pilotage ou contrôle-commande

Dans la section 7.2.2.1, nous rappelions que les services marketing des constructeurs considèrent que l'interface de commande d'une chaîne de traction ne doit pas s'écarter de celle d'un véhicule conventionnel équipé d'une boîte de vitesses automatique.

Dans ces conditions, les seuls moyens dont dispose un conducteur pour commander la chaîne de traction hybride d'un véhicule se réduisent à la pédale d'accélérateur et le levier de commande de boîte PRND.

Les différentes positions PRND du levier de commande de boîte correspond à (P) la position parking, (R) la marche arrière, (N) la position neutre ou point mort et (D) la marche avant.

La pédale d'accélérateur permet au conducteur de fixer le couple de consigne (F à la roue en fonction de la vitesse du véhicule.

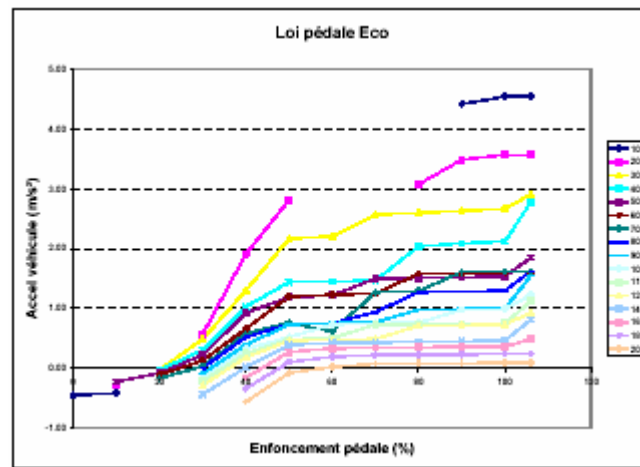


Figure 7.28. Loi pédale exprimée en accélération véhiculaire

Le système de contrôle-commande a donc la charge de contrôler l'état de la chaîne de traction et de la piloter en fonction d'une part des demandes du conducteur et d'autre part de l'état de la chaîne et de paramètres véhicule.

Il a donc pour fonction de déterminer le (ou les) rapport(s) de démultiplication liant les moteurs (thermique et électrique) aux roues motrices en fonction de la vitesse du véhicule et de déterminer le point de fonctionnement de chacun d'eux en fonction de la puissance demandée aux roues.

Cette détermination des points de fonctionnement peut s'effectuer suivant de multiples stratégies visant dans tous les cas à minimiser la consommation de carburant et la quantité de CO₂ émis dans l'atmosphère.

Par exemple, dans [RAH 00] Z. Rahman et ses co-auteurs présentent deux stratégies de contrôle d'une chaîne de traction hybride parallèle très simples : la stratégie dite du « Thermostat » d'une part et celle du « Power Split » d'autre part.

La première stratégie, dite du « Thermostat » consiste à couper le moteur thermique chaque fois que la batterie dépasse un certain niveau de charge (SOCH > x%, 80 % par exemple, en fonction des caractéristiques de la batterie) et à le mettre en œuvre chaque fois que la batterie descend au dessous d'un autre seuil (SOCL < y%, 60 % par exemple). Tant que l'état de charge de la batterie est supérieur à SOCL, la chaîne de traction fonctionne en mode électrique. Dès que ce seuil est franchi, le moteur thermique est démarré et la chaîne de traction fonctionne en mode hybride ou en mode thermique recharge batterie tant que l'état de charge de la batterie est en dessous de SOCH. Si elle dépasse cet état de charge le moteur thermique est arrêté et la chaîne passe en mode électrique. Il s'agit d'une stratégie très rustique.

La seconde stratégie, dite du « Power split » consiste à ne pas utiliser le moteur thermique dans les domaines de fonctionnement où il est peu performant par exemple dans domaine défini par $\omega_{mth} < 2000$ tr/mn. En effet dans ce domaine, son rendement est médiocre. On écarte du domaine d'utilisation du moteur thermique le domaine défini par $C_{mth} < 0.6 * C_{max}$. Ces domaines sont des domaines d'exclusion dans lesquels le moteur thermique est arrêté. Dans le reste du domaine de fonctionnement, le point de fonctionnement du moteur thermique est choisi de façon à se situer sur la courbe de consommation optimale. Il est de ce fait, soit en dessous, soit au dessus, du point de fonctionnement requis pour fournir la puissance requise à la roue. Dans le premier cas, la chaîne fonctionnera en mode hybride, dans le

second en mode traction recharge batterie. Il s'agit d'une stratégie légèrement moins rustique que la précédente.

Ces stratégies sont ensuite évaluées d'abord par des moyens de simulation et ensuite à l'occasion d'essais dans différents environnements : environnements véhicules variables, cycles d'utilisation variés, architectures de chaînes de traction variées.

Les évaluations mettent en évidence des résultats tels que les économies de carburant augmentent avec le taux d'hybridation. Lorsque le facteur d'hybridation est important, les deux stratégies se valent. Ils sont plus contrastés à de faibles taux.

De fait le nombre de stratégies de pilotage des chaînes de traction envisageables est très important et la littérature surabondante n la matière. Elle montre qu'il n'existe pas une stratégie optimisée de pilotage mais plusieurs stratégies acceptables selon les domaines d'utilisation du véhicule.

Une stratégie ou plusieurs stratégies sont alors implantées sur une chaîne physique de contrôle commande qui ferme une boucle sur la chaîne de traction instrumentée à l'aide de capteurs et d'actionneurs comme montré sur la figure ci-dessous.

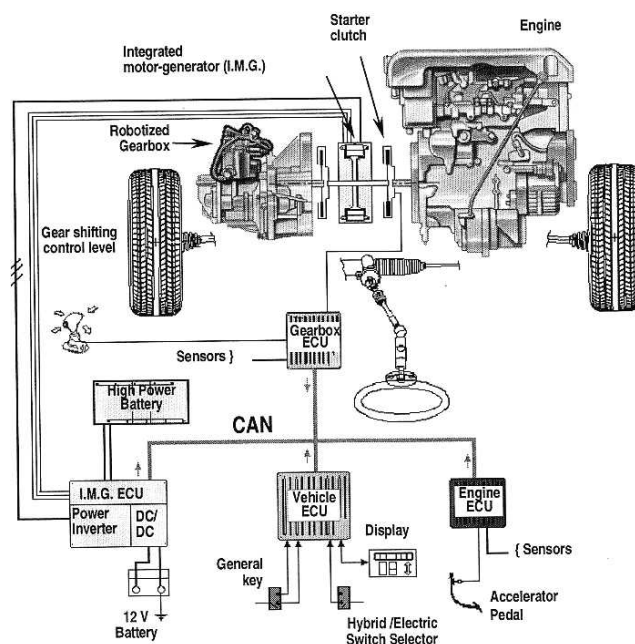


Figure 7.29. Exemple de chaîne de contrôle-commande de GMP

Cette figure met en évidence une architecture physique répartie sur un bus CAN, suivant plusieurs unités de traitement (ECU), coordonnées par un calculateur véhicule (Vehicle ECU). Ces ECU sont informées de l'état de la chaîne de traction et du véhicule par une série de capteurs. Elles actionnent les différents sous systèmes en fonction des actions du conducteur, de l'état de la chaîne et de la stratégie de commande adoptée.

7.3.7. Conception physique

Nous avons jusqu'à présent assez peu évoqué les caractéristiques physiques des constituants des chaînes de traction présentées ci-dessus.

L'agencement et l'installation sous capot des différents constituants et donc la question de la forme et l'encombrement de ces constituants va constituer une difficulté de conception majeure étant entendu que les plates-formes véhicules ne supportent a priori que peu de possibilité de modification.

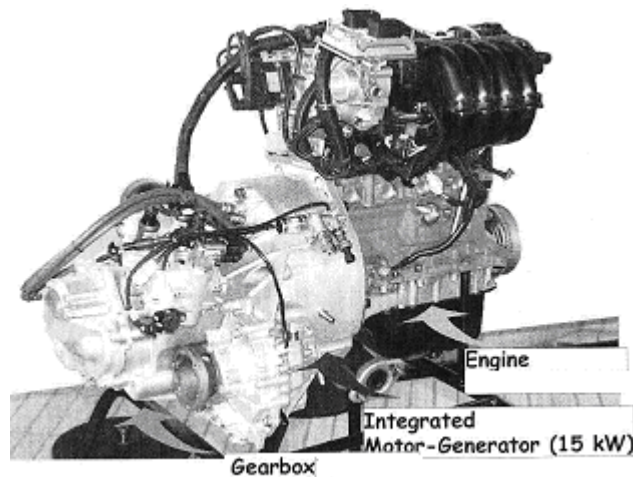


Figure 7.30. Exemple d'intégration physique de GMP

Les technologies, leurs intégrations et les matériaux vont également jouer un rôle important dans le domaine de la conception physique. Concevoir physiquement un processeur, c'est répondre à la question suivante : quelles caractéristiques physico-chimique du processeur vont-elles lui permettre d'assurer un ensemble de transformations dimensionnées par les études présentées ci-dessus.

Pour assurer la traction électrique du véhicule, le freinage récupératif, la recharge batterie à l'arrêt ou en traction quel type de machine électrique convient-elle le plus ? Ici encore la solution n'est pas unique, trois solutions au moins sont possibles : machine à courant continu, machine à courant alternatif triphasé asynchrone, machine à courant alternatif triphasé synchrone.

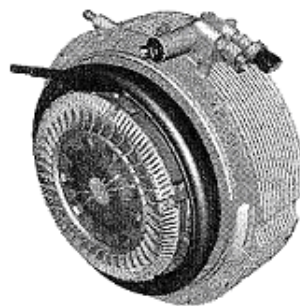


Figure 7.31. Moteur électrique d'un GMP Hybride en forme de galette

Pour assurer le stockage de l'énergie électrique provenant du freinage récupératif, ou pour reconstituer le potentiel électrique à l'arrêt ou encore en traction thermique, quel type de batterie convient-il le plus ? Ici encore la solution n'est pas unique, deux solutions au moins sont envisageables : batterie utilisant comme NiMH ou batterie Li-ion.

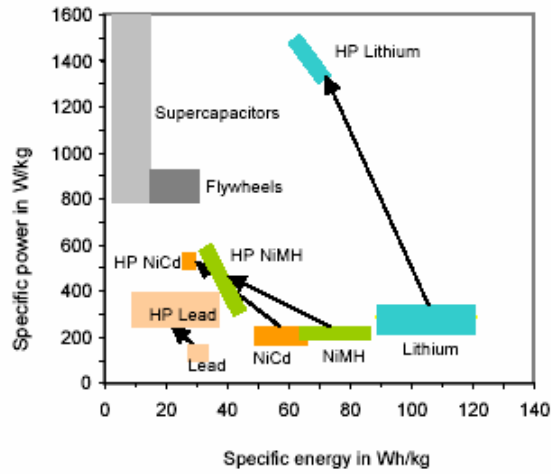


Figure 7.32. Performances de différents couples électriques

Pour assurer le transport et l'adaptation de l'énergie électrique entre la batterie et la machine électrique quelles caractéristiques électriques et physiques faut-il imposer au réseau électrique et au convertisseur AC/DC ?

7.3.8. Systèmes auxiliaires et ancillaires

Comme nous l'avons déjà souligné, un système ne produit pas seulement des effets recherchés (fonctions) mais également des effets non recherchés.

Le système de refroidissement de la chaîne de traction ne contribue pas à la réalisation des fonctions de service de celle-ci mais constitue un dispositif visant à réduire des effets non recherchés et indésirables de celle-ci.

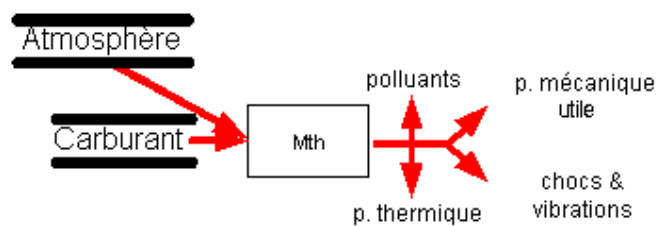


Figure 7.33. Effets concomitants d'une machine thermique

En son absence, le bon fonctionnement de la chaîne de traction ne pourrait être assurée durablement. En effet, la chaleur produite par le moteur thermique, l'électronique de puissance, la batterie et la machine électrique entraînant leur détérioration si elle n'est pas efficacement dissipée.

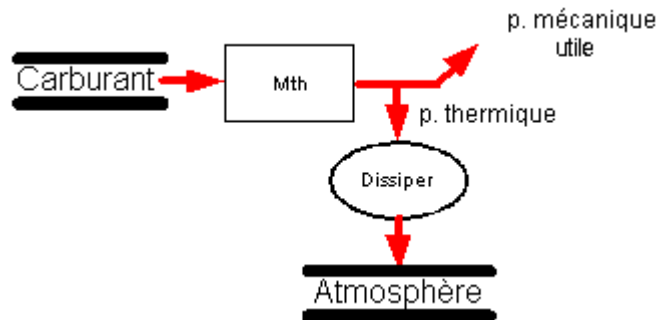


Figure 7.34. Refroidissement d'un moteur thermique

En outre, les machines thermique et électrique fonctionnent à des températures différentes ce qui peut imposer l'introduction d'un double circuit de refroidissement (d'une part basse température pour la machine électrique et l'électronique de puissance et d'autre part haute température pour le moteur thermique).

De la même manière, un système de dépollution ne contribue pas à la réalisation des fonctions de service d'un moteur thermique mais constitue un dispositif visant à réduire des effets indésirables concomitant au fonctionnement de celui-ci.

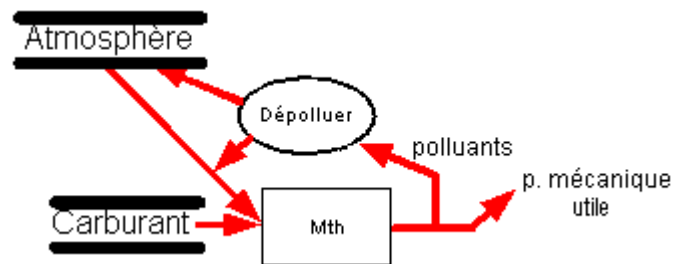


Figure 7.35. Dépollution d'un moteur thermique

7.3.9. Ingénierie de la décision

Dans cette section (7.3, Conception de systèmes de chaînes de traction hybrides) nous nous sommes efforcés de mettre en évidence la profusion et la diversité des choix possibles et ce à tous les niveaux du processus de conception.

Là où, guidé par la précipitation et victime de sa rationalité nécessairement limitée, le concepteur peut opter pour la première solution qui se présente, ce que nous avons nommé la prudence en ingénierie (6.2, La prudence en ingénierie) nous invite à rechercher, pas à pas, avec toutes les parties prenantes, un ensemble de solutions alternatives, d'évaluer en commune ces différentes alternatives vis-à-vis de critères explicites, à choisir une solution préférée et à justifier ces évaluations et ces choix.

Ils forment les choix motivés d'un ensemble de personnes autorisées dans un contexte déterminé.

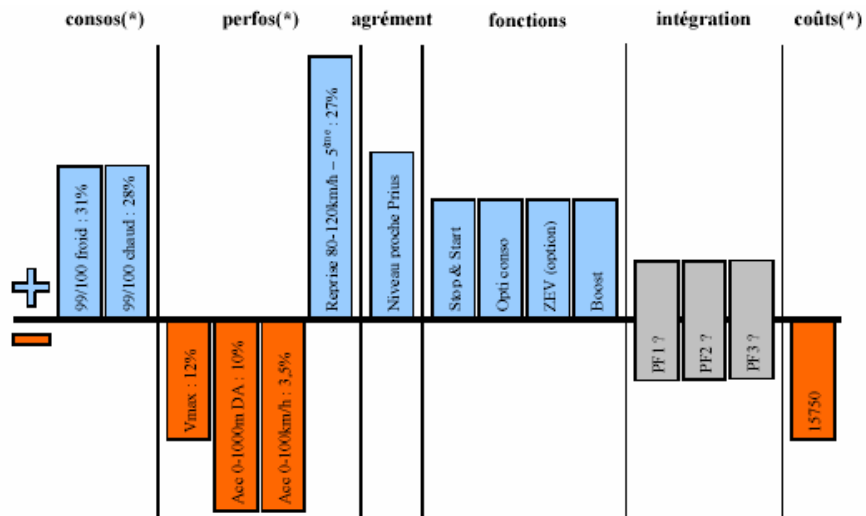


Figure 7.36. Exemple synoptique d'évaluation (incomplète) d'une chaîne hybride parallèle

Conclusion de la seconde partie

Les visions ontologique des systèmes techniques et méthodologique de leur ingénierie que nous avons développées et illustrées dans cette seconde partie viennent, selon nous, remédier aux fragilités théoriques et pratiques qui se dégagent des standards et du corpus des connaissances partagées par la communauté des ingénieurs système :

- au plan théorique, nous pensons avoir proposé une théorie des systèmes techniques consistante, incluant (1) une définition robuste du concept de système ainsi que des contributions (2) sur la notion de propriété matérielle des objets concrets, (3) sur les systèmes conceptuels et notamment la notion de modèle de systèmes concrets, (4) sur les effets recherchés et les effets indésirables des systèmes matériels, (5) ainsi qu'une théorie originale des exigences,
- au plan pratique, nous pensons avoir proposé une méthodologie de conception des systèmes techniques originale basée sur un certain nombre d'idées maîtresses : (1) l'entrelacement des processus d'ingénierie des exigences, de conception logique et physique, (2) le processus de conception comme processus de concrétisation, (3) comme processus de synthèse, et (4) d'entente entre les parties prenantes. Nous pensons, enfin, avoir introduit un dispositif permettant de conduire les processus d'ingénierie comme des processus collectifs de décisions justifiées servant de soubassement à une démarche méthodologique rationnelle d'ingénierie que nous désignons sous le concept de prudence.

Ces propositions ont fait l'objet de certaines illustrations que nous avons développées. Selon le mot de Karl Popper, elles demandent à être « corroborées » c'est-à-dire à être confrontées à un ensemble de tentatives de réfutations dont l'issue en déterminera la pertinence.

Conclusions et perspectives

Les travaux de recherche que nous avons présentés dans ce mémoire ont portés sur un ensemble de propositions visant à améliorer les processus d'ingénierie de système.

Nous avons traité cette problématique de façon conceptuelle et cherché à poser les bases d'une approche enrichie du processus d'ingénierie de système.

Afin de mettre en relief les principales contributions de nos travaux, nous rappelons les étapes successives de notre exposé.

Dans une première partie, nous avons dressé un état de l'art relatif au corpus des connaissances que détient une communauté professionnelle, celle des ingénieurs système (chapitre 1). Les visions proposées par les standards et le corpus de connaissances de l'ingénierie ont incontestablement permis de rationaliser les démarches d'ingénierie des systèmes. Cette rationalisation des démarches d'ingénierie met l'accent que sur l'une des formes de la rationalité, la rationalité instrumentale au détriment d'autres formes de la rationalité: la rationalité cognitive et la rationalité de l'entente. Il en résulte que le corpus méthodologique ainsi formé, très étoffé dans sa dimension processus (rationalité instrumentale), présente des insuffisances sur le plan de ses fondations théoriques (rationalité cognitive) et sur le plan de la prise en compte de la dimension collective de l'ingénierie (rationalité de l'entente).

Aussi, dans une deuxième partie, nous avons présenté un ensemble de propositions visant à rééquilibrer les points de vue (instrumental, cognitif, entente) qui prévalent en ingénierie des systèmes. Nous avons donc effectué un déplacement du barycentre du corpus vers des préoccupations qui ont trait aux fondations théoriques du corpus et qui relèvent de la rationalité cognitive (chapitre 5). Nous avons ensuite effectué un second déplacement du barycentre du corpus vers des préoccupations qui ont trait au caractère collectif et coopératif de l'activité d'ingénierie des systèmes techniques et qui relèvent de la rationalité de l'entente (chapitre 6). Nous l'avons fait en proposant une vision du processus d'ingénierie centré sur la synthèse autour d'un noyau décisionnel. Nous avons enfin illustré certaines de nos propositions à partir d'une présentation d'un cas concret, celui de la conception d'une chaîne de traction hybride (chapitre 7).

Au terme de ce travail, nous pensons avoir proposé :

- une analyse des difficultés que peuvent rencontrer les praticiens sur le terrain comme la conséquence d'une vision « unidimensionnelle » de la rationalité qui prévaut dans les activités techniques d'ingénierie et qui marginalise des dimensions tout aussi importantes de la rationalité (rationalité cognitive et rationalité de l'entente),
- une vision des systèmes techniques qui définit le facteur humain comme une composante essentielle. Cette vision des systèmes techniques s'inscrit dans une théorie générale des systèmes, consistante et globale. Au sein de cette théorie générale des systèmes, les systèmes techniques

trouvent une articulation satisfaisante une autre catégorie importante de systèmes abstraits, les modèles d'ingénierie les théories spécifiques qui permettent de représenter les systèmes techniques concrets. Elle comprend également un travail sur les concepts utilisés (système, modèle, propriété, exigence, fonction, modes et états, ..)

- une vision du développement des systèmes techniques comme un processus de synthèse à différents niveaux (synthèse d'objets, synthèse de points de vue) et une architecture des processus d'ingénierie organisée autour d'un processus pragmatique de décision et d'argumentation.

Les perspectives qui s'ouvrent à partir de ce travail, sont selon nous, de deux ordres :

- Au plan pratique, notre travail demande à être davantage corroboré. Cette corroboration passe par la mise en place de dispositifs explicites de conception en coopération tels que nous avons pu en ébaucher une description au chapitre 6.2. Elle passe également par le développement d'outils de conception (fonctionnelle et physique) qui mettent au centre de leur architecture un noyau décisionnel à partir duquel les différentes alternatives de conception peuvent être identifiées, évaluées, choisies ou archivées comme nous avons en ébaucher une description au chapitre 6.1.
- Au plan théorique, notre travail pourrait faire l'objet de multiples prolongements. Le premier d'entre eux pourrait concerner le développement d'une théorie rigoureuse des exigences applicables à un système. Les entreprises qui ont adopté une démarche d'ingénierie des exigences ploient sous l'inflation des exigences identifiées, lesquelles n'ont pas toujours la maturité voulue. Nous estimons que le dépassement de ces difficultés passe par une transformation d'une ingénierie des exigences empirique à une théorie formalisée des exigences (nous pensons notamment pouvoir mettre en évidence dans le futur la structure de semi treillis de la spécification d'un système technique). Un deuxième prolongement pourrait concerner les processus de vérification et de validation des systèmes techniques et les places respectives attribuables respectivement aux mécanismes de preuves et à ceux d'essais. La preuve pourrait concerner tout ou partie du processus désigné par l'EIA-632 de vérification de la conception. Un dernier prolongement pourrait concerner l'intégration de l'ingénierie humaine à l'ingénierie des systèmes techniques. D'autre part, notre ontologie des systèmes techniques devrait pouvoir supporter des développements concernant les systèmes de systèmes auxquels des industriels accordent un intérêt grandissant depuis quelques années.

Bibliographie

- [ANU 99] J Anurit, K Newman and Chansarkar B A, *Consumer Behaviour of Luxury Automobiles: A Comparative Study between Thai and UK Customers' Perceptions*, 1999, Marketing, Series. 1-17
- [ARQ 99] Philippe. Arquès, *Moteurs alternatifs à combustion internes*, Ellipses, 1999.
- [AUB 62] Pierre Aubenque, *La Prudence chez Aristote*, PUF, 1962
- [BER 73] Ludwig von Bertalanffy, *Théorie générale des systèmes*, Dunod, 1973 (édition originale 1968)
- [BLA 98] Blanchard & Fabrycky, *Systems Engineering and Analysis*, Prentice Hall, 3^{ième} édition, 1998
- [BOS 00] Bosch, *Automotive Handbook*, 5^{ième} édition, 2000
- [BOU 56] Kenneth E. Boulding, *General systems theory: the skeleton of science*, Management Science, vol 2 N° 3, avril 1956
- [BRE 00] Bertrand de la Bretesch, *La Méthode APTE : analyse de la valeur, analyse fonctionnelle*, Editions Pétrelle, 2000
- [BRI 00] James Brill, Jean Chevallier & Jean-Luc Merchadou, *Manuel des meilleures pratiques pour le développement des projets spatiaux*, Cepadues-Editions, mars 2000
- [BUN 72] Mario Bunge, *Method, Model and Matter*, Reidel Publishing Company, 1972
- [BUN 77] Mario Bunge, *Treatise on Basic Philosophy, vol 3, Ontology I: The furniture of the world*, Reidel Publishing Company, 1977
- [BUN 79] Mario Bunge, *Treatise on Basic Philosophy, vol 4, Ontology II: A World of Systems*, Reidel Publishing Company, 1979
- [CHA 02] Amaresh Chakrabarti, *Engineering Design Synthesis*, Springer, 2002
- [CE-93/116] Directive 93/116/CE de la Commission du 17 décembre 1993 portant adaptation au progrès technique de la directive 80/1268/ CEE du Conseil relative à la consommation de carburant des véhicules à moteur, JOCE du 02.01.1994
- [CMMI 02] Capability Maturity Model Integration, CMMI for Systems Engineering and Software Engineering Capability Maturity Model Integration, (CMMI-SE/SW, V1.1), CMU/SEI-2002-TR-001
- [CRO 77] Michel Crozier, Erhard Friedberg, *L'acteur et le système*, Le Seuil, 1977
- [DAV 00] Patrice David, Sarah Samadi, *La théorie de l'évolution, une logique pour la biologie*, Flammarion Champs Université, 2000
- [DEF 85] Yves Deforge, *Technologie et génétique de l'objet industriel*, Maloine, 1985
- [DO 254 00] Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware, RTCA, 2000
- [DUR 93] Emile Durkheim, *De la division du travail social*, document électronique produit par J.M. Tremblay, collection "Les classiques des sciences sociales" 1893

- [ECSS-E-10-A 96] European Cooperation for Space Standardization, Space System System Engineering, 19 avril 1996, *en cours de révision*,
- [ECSS-E-10-05A 99] European Cooperation for Space Standardization, *Space engineering, Functional Analysis*, 13 avril 1999
- [EEM 96] , F. van Eemeren, R. Grootendorst, F. Snoeck Henkemans, *Fundamentals of Argumentation Theory*, Laurence Erlbaum Associates Publishers, 1996
- [EIA 632 03] ANSI/EIA-632-1998, *Processes for engineering a system*, Approved 7 January 1999, Reaffirmed 2003
- [EN-1325] *Vocabulaire du Management par la Valeur, de l'Analyse de la Valeur et de l'Analyse Fonctionnelle*, 1996
- [EPRI 00] Electric Power Research Institute (EPRI), *HEV Market Potential*, 2000.
- [EUCAR 03] EUCAR (the European Council for Automotive R&D), *Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the european context*, CONCAWE, EU Commission's Joint Research Centre, *December 2003*
- [HAB 01] Jürgen Habermas, *Vérité et Justification*, Gallimard NRF Essais, 2001
- [HAR 98] David Harel & Michal Politi, *Modeling Reactive Systems with Statecharts*, 1998
- [HAT 88] Hatley & Pirbhai, *Strategies for Real Time System Specification*, Dorset House Publishing, 1988
- [HAT 00] Hatley, Hruschka & Pirbhai, *Process for System Architecture and Requirements Engineering*, Dorset House Publishing, 2000
- [HOR 96] Max Horkheimer, *Critique of Instrumental Reason*, The Continuum Publishing Company, 1996
- [HUB 88] Vladimir Hubka & W.E Eder, *Theory of technical systems*, Springer, 1988
- [IDEF0 93] National Institute of Standards and Technology, *Integration Definition for Function Modeling (IDEF0)*, 1993
- [IEEE 1220-05] IEEE Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process , Approved 8 December 1998 révisé en 2005.
- [ISO 15288 02] ISO/IEC 15288-2002, *Life-Cycle Management—System Life Cycle Processes*, Octobre 2002
- [ISO 19760 03] ISO/IEC TR 19760-2003, *Systems engineering — A guide for the application of ISO/IEC 15288 (System life cycle processes)*, 15 November 2003
- [LAT 93] Bruno Latour, *Aramis ou l'amour des techniques*, Editions de la Découverte, 1993
- [LEA 96] Mac Lean, A, and ali, *Questions, Options and Criteria : Elements of Design Space Analysis*, in Design Rationale, Concepts, Techniques and Use, 53-105, LEA, 1996.
- [LER 64] André Leroi-Gourhan, *Le geste et la parole*, Albin Michel, 2 tomes 1964 et 1965
- [LEV 97] Jean Marc Levy-Leblond et Françoise Balibar, *Quantique Rudiments*, Masson 1997
- [LIS 90] Michel Lissandre, *Maîtriser SADT*, Armand Colin, 1990
- [MAR 99] Danilo Martuccelli, *Sociologies de la Modernité L'itinéraire du XX^e siècle*, Folio Essais, Gallimard, 1999
- [MCA 91] Raymond McCall, *PHI: A Conceptual Foundation for Design Hypermedia*, Design Studies, Vol. 12, No. 1, 1991
- [MEI 98] Jean Pierre Meinadier, *Ingénierie et intégrations des systèmes*, Hermès, 1998
- [MEN 64] E Mendelson, *Introduction to Mathematical Logic*, Van Nostrand 1964
- [MIL-STD-499B 95] Military Standard *Systems Engineering*, Draft 1994.
- [MOI 77] Jean-Louis Le Moigne, *La théorie du système général, théorie de la modélisation*, PUF, 1977
- [MOI 90] Jean-Louis Le Moigne, *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, 1990

- [NF X50-127-02], Outils de management - *Maîtrise du processus de conception et développement*, Avril 2002
- [PEN 94] Jean-Michel Penalva, Eric Page, *Sagace : la modélisation des systèmes dont la maîtrise est complexe*, ILCE, 1994
- [PEN 97] Jean-Michel Penalva, *La modélisation par les systèmes en situations complexes*, thèse Paris-Sud Orsay, 1997
- [RAH 00] Z. Rahman, K. L. Butler and M. Ehsani, *A Comparison Study Between Two Parallel Hybrid Control Concepts*, SAE TECHNICAL PAPER SERIES 2000-01-0994 SAE 2000 World Congress Detroit, Michigan, March 6-9, 2000
- [RG Aéro 00040A – 99] *Recommandation Générale pour la Spécification de Management de Programme*, BNAE, Avril 1999
- [RIT 72] Horst Rittel & Werner Kunz, *Issues as Elements of Informations Systems, july 1970, WP 131, Berkley, University of California*
- [ROO 95] Roozenburg et Eekels, *Product Design : Fundamentals and Methods*, Wiley, 1995
- [SCH 11] Joseph Schumpeter, *Théorie de l'évolution économique, Recherches sur le profit, le crédit, l'intérêt et le cycle de la conjoncture*, 1911
- [SCH 42] Joseph Schumpeter, *Capitalisme, socialisme et démocratie*, 1942
- [SHU 97] Simon J. Buckingham Shum, Allan MacLean, Victoria M.E. Bellotti & Nick V. Hammond, *Graphical Argumentation and Design Cognition*, Knowledge Media Institute, KMI-TR-25, feb 1997, KMI-TR-25, février 1997
- [SML 06] Systems Modeling Language (SysML) Specification, version 1.0, draft, SysML Partners, 03 avril 2006
- [SUB 99] Nadarasa Subramaniam, *The European Automotive Industry*, 1999
- [SUH 01] Nam P. Suh, *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Oxford University Press, 2001
- [TOU 93] Stephen E. Toulmin, *Les usages de l'argumentation*, PUF, l'interrogation philosophique, 1993
- [UML 05] UML 2.0 : *OMG Unified Modeling Language Specification*, Object Management Group, Version 2.0, Août 2005.
- [VAR 89] Francisco Varela, *Autonomie et Connaissance*, Le Seuil , 1989
- [WAL 77] Bernard Walliser, *Systèmes & Modèles*, Le Seuil, 1977
- [WAR 85] Paul Ward & Stephen Mellor, *Structured Development for Real Time Systems*, Prentice Hall, 1985
- [WIE 48] Norbert Wiener, *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine*, The MIT Press, 1948.
- [X50-127-02], Outils de management - *Maîtrise du processus de conception et développement*, Avril 2002,
- [X50-101 95] Association Française pour l'Analyse de la Valeur (AFAV), FD **X50-101**, *Analyse Fonctionnelle - L'Analyse Fonctionnelle outil interdisciplinaire de compétitivité*, 1995

Annexes

Annexe 1 : Ontologie des systèmes technologiques

Dans cette annexe, nous poursuivons le tour d'horizon concernant la vision que se font des auteurs majeurs de l'ingénierie des systèmes.

Annexe 1.1 Les systèmes selon B. Blanchard et W. Fabrycky

Benjamin S. Blanchard et Wolter J. Fabrycky sont d'éminentes personnalités de l'INCOSE. Leurs travaux sur le « Systems Engineering » y font autorité.

Dans *Systems Engineering and Analysis* [BLA 98], ceux-ci présentent une vue beaucoup plus large des systèmes que celle proposée par l'INCOSE puisque celle-ci couvre non seulement les systèmes artificiels (abstraites et concrets) mais aussi les systèmes naturels. Pour Blanchard & Fabrycky, un système est caractérisé par :

- Ses composants,
- Ses attributs qui sont les propriétés ou les manifestations discernables de ses composants,
- Ses relations qui lient entre eux composants et attributs.

Blanchard & Fabrycky rappellent la formule selon laquelle « *a system is more than the sum⁴³ of its components parts* ».

Les composants d'un système coopèrent en fonction d'une finalité (objectif ou but commun) qui doit être précisément définie. Les actions finalisées qu'un système réalise sont appelées fonctions du système. Ces fonctions se réalisent au moyen d'altérations (transformations) de matière, d'énergie et d'information. Ce qui permet à Blanchard et Fabrycky d'introduire une distinction intéressante entre des composants structuraux, des composants opérants et des composants flux parmi les composants d'un système.

Ainsi pour un moteur à combustion interne, la culasse appartient à la catégorie des composants structuraux, l'équipage mobile à celle des composants opérants et la charge combustible à celle des composants flux.

Blanchard & Fabrycky introduisent ensuite les notions de système et de sous-système comme des notions relatives, un système peut être un sous-système d'un système englobant et être lui-même composé de sous systèmes.

⁴³ Les auteurs, invoquant cette formule très populaire, omettent cependant de nous préciser ce que pourrait bien être la « somme » de parties, comme la « somme » d'un moteur et d'une boîte de transmission.

La référence à un **environnement** ne vient qu'ensuite pour distinguer les systèmes clos des systèmes ouverts caractérisés par des échanges de matière, d'énergie ou d'information avec leur environnement soit en entrée ou inputs ou en sortie du système ou outputs.

Blanchard & Fabrycky proposent une taxinomie intéressante des systèmes existants en proposant la décomposition suivante :

- Systèmes naturels
- Systèmes artificiels
 - Systèmes artificiels abstraits ou conceptuels
 - Systèmes artificiels concrets ou physiques
 - Systèmes statiques
 - Systèmes dynamiques

Ainsi Blanchard & Fabrycky adoptent une position réaliste, c'est-à-dire que, pour eux des systèmes comme les systèmes naturels ou les systèmes artificiels concrets existent indépendamment d'observateurs humains qui peuvent les connaître ou les ignorer.

On peut noter qu'ils introduisent la notion d'**entropie** d'un système, comme son degré de désorganisation, sans réellement formaliser sa définition ni en tirer un parti ultérieurement dans l'ouvrage. Il s'agit donc plus d'une référence culturelle qu'un concept clé. De même la notion de **complexité** n'est pas abordée.

Dans ce travail, B. Blanchard et W.Fabrycky citent quatre référents principaux :

- Norbert Wiener [WIE 48],
- Ludwig von Bertalanffy [BER 73],
- Kenneth Boulding [BOU 56] et
- Vladimir Hubka [HUB 88].

Du premier (N Wiener), ils rappellent les travaux sur le contrôle, la régulation et sur l'homéostasie au sein de divers procédés, qui ont bien évidemment une place centrale aux yeux de ceux qui produisent des systèmes concrets artificiels. Cette maîtrise permet la conception et la production de systèmes correctement contrôlés et qui produisent de manière prévisible des effets recherchés.

De L. von Bertalanffy, B. Blanchard et W.Fabrycky rappellent le dessein d'une théorie du système général, capable de dégager des principes valables pour tous les systèmes et indépendants de la nature substantielle des systèmes concrets considérés.

Du troisième (K. Boulding), ils présentent la taxonomie des systèmes en neuf niveaux :

- Les *frameworks* ou structures statiques comprenant la géographie et l'anatomie de l'univers,
- Les *clockworks* ou systèmes dynamiques simples,
- Les systèmes cybernétiques capables de traiter, de transmettre et d'interpréter de l'information,
- Les structures conservatives (self-maintaining structure) comme les *cellules* ou organismes vivants,
- Les *végétaux*,
- Les *animaux* capables de mobilité, d'un comportement finalisé et d'une attention (awariness) de soi,
- Les *humains* dotés d'une conscience de soi et d'une capacité à produire, assimiler et interpréter des symboles,
- Les *organisations sociales* au niveau desquelles se situent les systèmes de valeurs, le contenu et le sens des messages, la mémoire, l'art et les émotions complexes.

- Les *inconnaissables* sur lesquels nous pouvons faire des hypothèses sans pouvoir leur apporter de réponses.

Enfin B. Blanchard et W.Fabrycky soulignent les emprunts qu'ils font à la théorie des systèmes technologiques des quatrièmes (Hubka & Eder), sans toutefois préciser la nature de ces emprunts. En particulier, ils ne reprennent pas à leur compte la notion de sorties secondaires (secondary outputs) que Hubka et Eder introduisent, en précisant que ces sorties secondaires sont, la plupart du temps, des sorties indésirables du système technologique.

Avant de poursuivre, il nous paraît intéressant de présenter ici⁴⁴, ce que L Von Bertalanffy [BER 73], pages 73-77) soutient à propos d'un concept clé : le concept de **finalité**. Il souligne que ce terme a plusieurs significations dont les deux suivantes :

- une première signification peut concerner tous les systèmes (naturels et artificiels) dont l'évolution peut être décrite par des lois (lawful systems). Ces lois d'évolution, en particulier lorsqu'elles sont ramenées à des équations différentielles, peuvent être présentées de deux manières symétriques et équivalentes : une expression de l'évolution à partir de **conditions initiales**, c'est la **forme causale de la loi** de comportement ou inversement une expression de l'évolution vers des **conditions finales**, c'est la **forme finale de la loi** de comportement⁴⁵. On connaît de multiples exemples de cette expression finale des lois d'évolution : le principe de Maupertuis en mécanique, celui de Le Chatelier en chimie physique, la règle de Lenz en électricité,... Il y a équivalence entre ces deux formes, et dans ce cas, parler de finalité d'un système n'est rien d'autre qu'évoquer la destination vers laquelle la loi d'évolution du système le dirige. Von Bertalanffy souligne le caractère trompeur de la forme finale des lois d'évolution en raison des contaminations possibles par la seconde signification du terme finalité,
- une seconde signification de finalité suppose la présence d'une puissance créatrice, un *deus ex-machina* capable d'assigner de l'extérieur un but au système. Il est clair que cette signification de finalité concerne directement systèmes artificiels. Elle peut également concerner l'ensemble des systèmes naturels dans une conception religieuse du monde⁴⁶.

Annexe 1.2 Les systèmes selon J.P. Meinadier

Il ne semble pas qu'une définition du concept de système ait fait, au sein de l'AFIS, l'objet de controverses et ait, par conséquent, nécessité un consensus explicite, comme cela a été le cas à l'INCOSE. Aussi tiendrons nous comme pertinentes les propositions faites par Jean Pierre Meinadier [MEI 98].

Jean Pierre Meinadier est sans doute une des plus éminentes personnalités de l'AFIS. Ses travaux sur l'ingénierie et l'intégration des systèmes y font autorité. Jean Pierre Meinadier propose trois définitions d'un système dont les deux dernières sont duales :

- « Ensemble composite de personnels, de matériels et de logiciels organisés pour que leur interfonctionnement permettent dans un environnement donné de remplir les missions pour lesquelles il a été conçu » page 24.
- « Ensemble d'éléments en interaction mutuelle et en interaction avec l'environnement, organisé en fonction d'un but » page 111,
- « Ensemble de processus synchronisés en fonction d'un but » page 112.

⁴⁴ bien que B. Blanchard et W.Fabrycky n'aient pas éprouvé le besoin d'y revenir.

⁴⁵ « De E. von Hartman (...) à moi-même, la finalité a été définie comme l'inverse de la causalité » (0, page 75).

⁴⁶ Par exemple, Maupertuis qui voit dans son principe du minimum la preuve de l'existence d'un créateur réfléchi.

Il ressort de ces définitions que les systèmes auxquels l'auteur s'intéresse sont exclusivement des systèmes finalisés, en d'autres termes, des créations humaines et écarte de ce fait, les systèmes qui ne le sont pas, comme par exemple, notre système solaire dans notre galaxie, une société de termites dans la savane, etc.

Dans son travail, Jean Pierre Meinadier cite plusieurs référents au nombre desquels :

- Bernard Walliser [WAL 77],
- Jean Louis Le Moigne [MOI 77] et [MOI 90], et
- Jean Marie Penalva [PEN 94] et [PEN 97].

Les références au travail de B. Walliser sont multiples et appuyées, ce qui justifie le paragraphe suivant. Les références à J-L Le Moigne sont plus allusives. En revanche, Jean Pierre Meinadier consacre à J-M Penalva et à la méthode SAGACE des développements significatifs pour qu'il soit nécessaire d'évoquer les thèses constructivistes dont se réclament ces deux derniers théoriciens.

Annexe 1.3 Les systèmes et les modèles de B. Walliser

L'ouvrage de Bernard Walliser, intitulé « *Systèmes et Modèles* » et sous-titré « *introduction critique à l'analyse de systèmes* » s'inscrit dans une veine réaliste : Il y a dans le monde réel auquel nous appartenons des objets matériels, des individus, etc. qui existent, qui sont des systèmes et dont la qualité de systèmes (être-un-système) est indépendante de nous. Les modèles que nous produisons sont des tentatives plus ou moins réussies de nous représenter ces systèmes : « *Dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique* » ([WAL 77], page 116).

Cette distinction entre systèmes d'une part et modèles d'autre part donne à l'ouvrage son architecture de premier niveau : les premiers chapitres traitent des systèmes concrets tandis que le reste du livre, à partir du chapitre V, traite des modèles.

B. Walliser ne propose pas de définition synthétique de ce qu'il désigne par le terme de système, en revanche il en donne différentes caractéristiques au fil de l'ouvrage.

B. Walliser commence par souligner le caractère essentiel de l'environnement : « *un système se définit comme une entité (...) qui se détache de son contexte (...) tout en procédant à des échanges avec son environnement* » (p13). Ce qui lui permet de distinguer les **systèmes quasi-isolés**⁴⁷ (ou boîte noire) des **systèmes à états**⁴⁸. La notion de système à états le conduit ensuite aux notions de **système causal** (déterministe, stochastique ou incertain) et de **système finalisé**. Comme il le souligne, ces deux notions sont des formes duales de description d'une même réalité, celle d'un système obéissant à une loi d'évolution. B. Walliser relève l'amalgame fréquent entre finalité qui traduit l'existence d'une loi de comportement et **intentionnalité** dénote le projet d'un sujet créateur.

Dans un second temps, B. Walliser s'intéresse à la composition d'un système en introduisant la notion de système quasi décomposable. Ainsi note-t-il, « *un système est dit quasi-décomposable s'il peut-être décomposé en sous-systèmes quasi⁴⁹-isolés, reliés entre eux et avec l'environnement* »⁵⁰. Cette notion lui permet d'introduire les notions de sous-systèmes, de hiérarchies de systèmes emboîtés, de propriétés

⁴⁷ Un système quasi-isolé est défini comme la donnée d'une trajectoire d'entrée et d'une trajectoire de sortie qui sont associées.

⁴⁸ L'état d'un système à un instant donné est déterminé par la valeur de l'entrée à cet instant et aux états antérieurs du système (fonction de transfert) et détermine par ailleurs la valeur de la sortie à cet instant en fonction de la valeur de l'entrée (fonction d'observation).

⁴⁹ On notera la caractère étrangement « flottant » du préfixe *quasi*.

⁵⁰ 0, page 39.

microscopiques attribuables à des sous systèmes et de propriétés macroscopiques attribuables au seul système (mais à aucune de ses parties). Il introduit également une notion intéressante, celle de matrice de couplage qui permet de rendre compte du degré de dépendance et d'indépendance entre les différents sous-systèmes d'un système, un couplage entre deux sous-systèmes traduisant une interaction (univoque ou réciproque) entre eux. C'est dans ce contexte qu'il introduit les notions de propriétés microscopiques (spécifiques de chaque sous-système) et de propriétés macroscopiques (définies au niveau global du système). Ensuite de quoi, B. Walliser s'intéresse aux types de couplage et aux modes d'organisation des systèmes.

Dans un troisième chapitre, B. Walliser s'intéresse à l'évolution des systèmes dans le temps en introduisant la notion d'invariant (propriété du système qui se conserve au cours du temps) ainsi que celle de niveaux d'invariance temporelle. Il tisse ensuite entre cette notion de niveaux d'invariance temporelle des correspondances avec des niveaux d'emboîtements dans les hiérarchies de systèmes qu'il met enfin en relation avec des hiérarchies de finalités (au sens rappelé ci-dessus, i.e. lois de comportement).

Après avoir évoqué les thèmes de la réversibilité et de l'irréversibilité, d'auto apprentissage et d'auto organisation, B Walliser traite dans un quatrième chapitre d'auto régulation et d'entropie des systèmes.

Annexe 1.4 Le constructivisme de J-L Le Moigne

« Un système complexe est un système que l'on tient pour irréductible à un modèle fini, aussi compliqué, stochastique, sophistiqué que soit ce modèle, quelque soit sa taille, le nombre de ses composants, l'intensité de leurs interaction ».

La modélisation des systèmes complexes, Dunod, 1990, page 3

L'ouvrage de Bernard Walliser, intitulé « *Systèmes et Modèles* » et sous-titré « *introduction critique à l'analyse de systèmes* » s'inscrit dans une veine réaliste : Il y a dans le monde réel auquel nous appartenons des objets matériels, des individus, etc. qui existent, qui sont des systèmes et dont la qualité de systèmes (être-un-système) est indépendante de nous. Les modèles que nous produisons sont des tentatives plus ou moins réussies de nous représenter ces systèmes : « *Dans sa définition la plus large, la notion de modèle recouvre toute représentation d'un système réel, qu'elle soit mentale ou physique, exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique* » ([WAL 77], page 116).

C'est dans un paysage professionnel et intellectuel largement dominé par le **réalisme** (le monde qui nous entoure existe par lui-même et indépendamment de nous), le **mécanisme** (ce monde fonctionne à la manière des machines que nous produisons) et la **méthode analytique** (que l'on pourrait naïvement exprimer comme suit : « pour résoudre un problème, il suffit de le décomposer ») que les propositions de Jean-Louis Le Moigne ([MOI 77] et [MOI 90]) apparaissent. Elles viennent s'y inscrire en faux et y affirmer des propositions alternatives. Elles introduisent une coupure entre un avant et un après, un « *changement de paradigme* » entre une vision hypothéquée par le cartésianisme et une vision systémique, comme l'auteur le suggère lui-même à maintes reprises.

Au réalisme que nous évoquions ci-dessus, Jean-Louis Le Moigne oppose le **constructivisme**, c'est-à-dire l'affirmation selon laquelle le sujet connaissant (lui, nous, les autres, ..) construit le réel qui l'environne à partir des phénomènes qui s'y déroulent. Cette construction du réel par le sujet connaissant interdit toute séparation entre l'objet à connaître et le sujet connaissant que le réalisme (naïf) postule. La thèse constructiviste n'est pas nouvelle, elle est, par exemple, au fondement de différentes traditions épistémologiques⁵¹ et peut sembler à bonne distance des préoccupations d'une communauté professionnelle ayant peu de considération pour le questionnement métaphysique.

⁵¹

Jean Louis Le Moigne se réfère quant à lui explicitement de Gaston Bachelard et de Jean Piaget.

Toutefois, J.L Le Moigne en tire au moins une thèse qui ne nous est pas indifférente : les systèmes physiques n'existent pas⁵². Si systèmes il y a, ils sont les produits résultants d'une construction intellectuelle élaborée par un ou des sujets connaissant (en fonction du ou des projets qu'ils forment). Il s'agit là, au moins dans un premier temps, celui du doute méthodologique, d'une (hypo)thèse parfaitement recevable.

Dans ces conditions, que sont les systèmes physiques ? (i.e, les objets concrets, réalités extra-linguistiques que nous désignons sous le terme de systèmes concrets ou physiques) Ils sont phénomènes uniquement connaissables par l'intermédiaire de modèles construits, bâtis en fonction des projets du sujet. C'est ici que vient s'inscrire la théorie du **Système Général** de J.L. Le Moigne comme catégorie a priori de l'entendement « systémique ».

Le Système Général apparaît alors comme la matrice à partir de laquelle viennent se former les différents systèmes « concrets » à propos desquels nous devisons.

Le schéma ci-dessous, tiré de la théorie du Système Général de J-L Lemoigne illustre clairement ce point de vue selon lequel le système (général) ne se situe pas dans le réel mais à la confluence de l'objet (à connaître), du sujet (connaissant) et du projet (du sujet connaissant).

Les systèmes « concrets » ne sont pas davantage dans un réel extérieur à ceux qui en parlent mais inscrit dans un espace de connaissances sous la forme de modèles portés par des sujets connaissant.

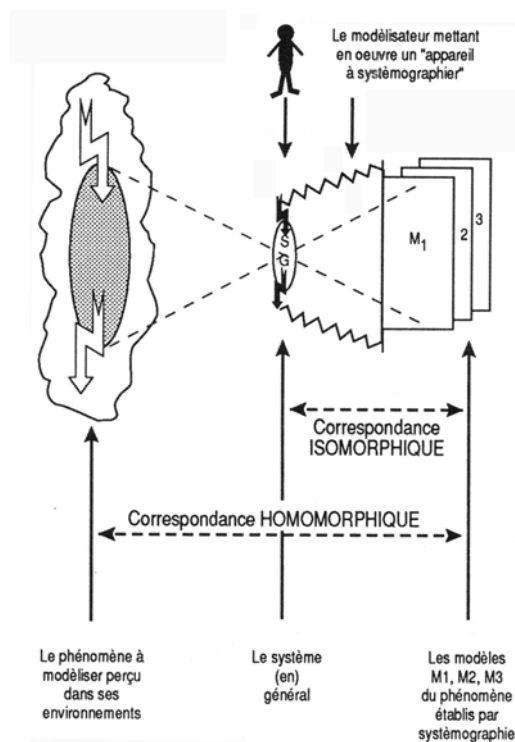


Figure A.1. Le systémographe de J-L Le Moigne.

⁵² On se rappelle ici la formule de Claude Bernard répétée à l'envi dans la littérature du courant systémique : « les systèmes ne sont pas dans la nature mais dans l'esprit des hommes ».

Le mécanisme également évoqué ci-dessus ne semble pas constituer, de manière centrale, un sujet de réflexion pour J.L Le Moigne qui en revanche s'intéresse de très près aux questions de méthode et en particulier à la méthode analytique. Il situe la méthode analytique entre la méthode « du modèle précédent » et la méthode systémique. En rappelant les quatre préceptes du Discours de la Méthode⁵³, c'est à Descartes qu'il réfère la méthode analytique⁵³. Sans en nier la pertinence, J.L. Le Moigne lui attribue un certain nombre d'échecs et la considère comme de plus en plus fréquemment inadéquate dans le traitement de problèmes qu'ils caractérisent comme complexes. Suivent des exemples de problèmes réfractaires selon l'auteur aux méthodes analytiques, de la délinquance juvénile à la dégradation des quartiers d'habitation en passant par croissance désespérante du chômage et la maîtrise de l'énergie nucléaire. Ainsi, il semblerait que pour J.L Le Moigne, l'incapacité des sociétés humaines à régler ses problèmes les plus cruciaux, les plus complexes pourrait être due à l'usage d'une méthode inadaptée, « *en tenant pour compliqués ces problèmes complexes et en les traitant par des méthodes analytiques, on les a rendus plus complexes encore* ».

C'est à partir de ces critiques que J.L Le Moigne initialise sa réflexion sur la **complexité** et sur la méthode qu'il préconise pour modéliser les systèmes complexes : la **systémographie**.

« *Un système complexe est (..) un système construit par l'observateur qui s'y intéresse. Celui-ci postule la complexité du phénomène sans pour autant s'astreindre à croire à l'existence naturelle d'une telle propriété dans la nature ou dans la réalité.* » ([MOI 90], page 24).

Il en donne aussi par ailleurs la formulation suivante « *modèles de phénomènes perçus comme complexes et construits par modélisation systémique* ».

La systémographie est présentée quant à elle, comme la procédure par laquelle on construit des modèles d'un phénomène perçu complexe, en le représentant délibérément comme et par un système en Général. Fondé sur une axiomatique dite conjonctive, le Système Général se décrit « *par une ACTION (enchevêtrement d'actions) DANS un environnement (« tapissé » de processus) POUR quelques projets (Finalités, Téléologie), FONCTIONNANT (faisant) ET SE TRANSFORMANT (devenant)* ».

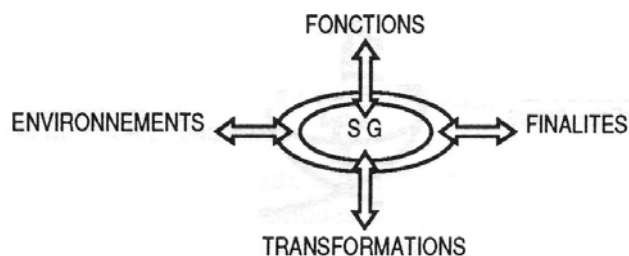


Figure A.2. Forme canonique du système général selon J-L Le Moigne.

La systémographie est la procédure qui partant du système général, sorte de matrice va produire dans un premier temps (temps du cadrage) une empreinte a priori, modèle systémique vide sans légendes, puis dans un deuxième temps (temps du développement) va consister à établir des correspondances entre les traits de ce modèle systémique et des traits perçus ou conçus du phénomène à modéliser (le modèle avec « légendes » étant par construction systémique).

⁵³ Sans accorder une attention particulière au troisième précepte parfois désigné comme précepte de la synthèse : « *le troisième, de conduire par ordre mes pensées en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu, ..* »

Dans cette vision, la question de la finalité des systèmes que L. von Beratanffy avait analysée et dont nous évoquions les termes dans l'annexe 1.1, devient limpide, les finalités d'un système sont les intentions qui animent le modélisateur dans le processus de processus de modélisation.

Dés lors, il est bien certain qu'un système est nécessairement finalisé (par le projet du sujet connaissant), c'est d'ailleurs ce que confirme le schéma ci-dessous, tiré de « *La modélisation par les systèmes en situations complexes* » de Jean Michel Penalva.



Figure A.3. *Les systèmes finalisés selon J-M Penalva.*

Soulignons pour conclure que la démarche proposée par Jean-Louis Le Moigne ne permet pas de définir séparément comme nous l'avons fait dans ce travail d'une part ce que sont les systèmes en général et les systèmes particuliers (pour nous ontologie des systèmes) et d'autre part de définir une ingénierie (JL Le Moigne parle lui d'une modélisation) des systèmes. Le système étant pour JL Le Moigne à la fois la matrice et les modèles, l'instrument et le produit de l'entreprise de la modélisation systémique.

Annexe 2 : Méthodes de conception des systèmes

Il existe de nombreuses techniques permettant de procéder à l'analyse et/ou à la synthèse d'un système. Dans son ouvrage ([MEI 98], chapitres 8 et 10), J.P Meinadier n'en dénombre pas moins de six avec SA-RT[HAT 88], Satetcharts [HAR 98] , Sagace [PEN 94], Reliasep, Fast, Apte [BRE 00] auxquelles on pourrait ajouter UML[UML 05], les langages de spécification SDL, Lustre, Signal et Esterel, le langage Z, le langage AADL, et la méthode B, les méthodes et moyens de simulation comme MatLab/Simulink, le langage HLA, sans encore pouvoir prétendre à l'exhaustivité.

Nous avons fait le choix de ne présenter que deux méthodes : (1) PSARE, digne héritière de SA-RT, qui nous paraît à la fois très représentative des approches dites fonctionnelles et également la plus avancée dans ces approches, et (2) Sagace comme représentant du courant porteur de l'ingénierie systémique.

Suite à cette présentation, nous faisons un rapide état d'avancement du projet de définition de SyS-ML [SML 06].

Annexe 2.1 PSARE

Deux des trois auteurs de PSARE [HAT 00], D. Hatley et I. Pirbhai furent dans, les années 1980, les auteurs d'une méthode de génie logiciel qui connut un très grand retentissement : SA-RT [HAT 88].

Si Hatley et Hruschka⁵⁴ consacrent la seconde partie de leur ouvrage à des études de cas, la première pose les bases conceptuelles de PSARE.

Après une définition minimaliste des systèmes technologiques, Hatley et Hruschka soutiennent que cinq regards peuvent être posés sur un système :

- Un regard orienté processus (processing view) :

Il consiste, selon les auteurs, à séparer dans le fonctionnement d'un système d'une part les flux d'information et d'autre part les flux de matière et d'énergie.

⁵⁴

Pirbhai est décédé à la date de publication de PSARE.

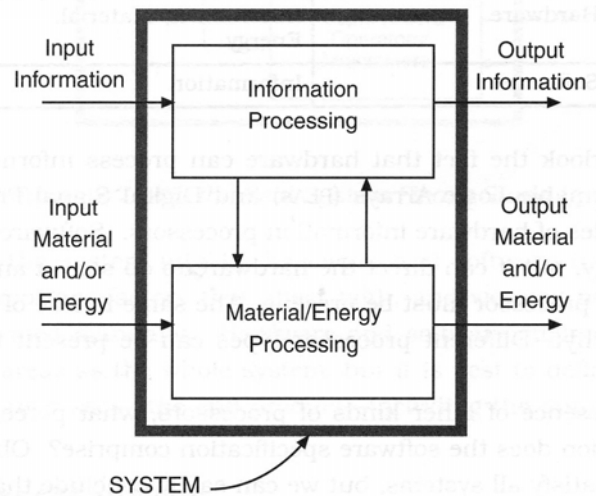


Figure A.4. Les systèmes comme processus coopérants selon PSARE.

- Un regard orienté processeurs (processor view)

Il consiste à répartir le fonctionnement du système sur trois types de processeurs : les processeurs **humains** et les processeurs **matériels** capables de traiter des flux de matière, d'énergie et d'informations et les processeurs **logiciels** qui ne traitent que des informations.

- Un regard orienté quoi/comment (What/How view)

Il consiste d'une part à distinguer dans la description d'un système ce qui est de l'ordre du besoin, de l'exigence et de l'attente (What) de ce qui est de l'ordre du moyen, du comment (How) venant satisfaire ou répondre au besoin et d'autre part à conserver la trace du chemin qui permet de passer du quoi au comment.

- Un regard orienté niveau d'intelligence (Level of Intelligence view)

Il consiste à distinguer dans le comportement d'un système ce qui relève de la réaction mécanique et ce qui au contraire relève du comportement adaptatif.

- Un regard orienté niveau d'activité (Level of Activity view)

Il consiste à distinguer dans la description d'un système les aspects statiques matérialisés par des réservoirs de matière, d'énergie ou d'informations des aspects dynamiques qui renvoient aux déplacements et aux transformations.

Ces cinq regards qui peuvent être posés sur un système nous aident à les analyser et à les spécifier.

Hatley et Hruschka proposent ensuite un modèle d'exigences c'est-à-dire une classification de ce que l'on peut attendre d'un système. Ce modèle est figuré sur le schéma ci-dessous.

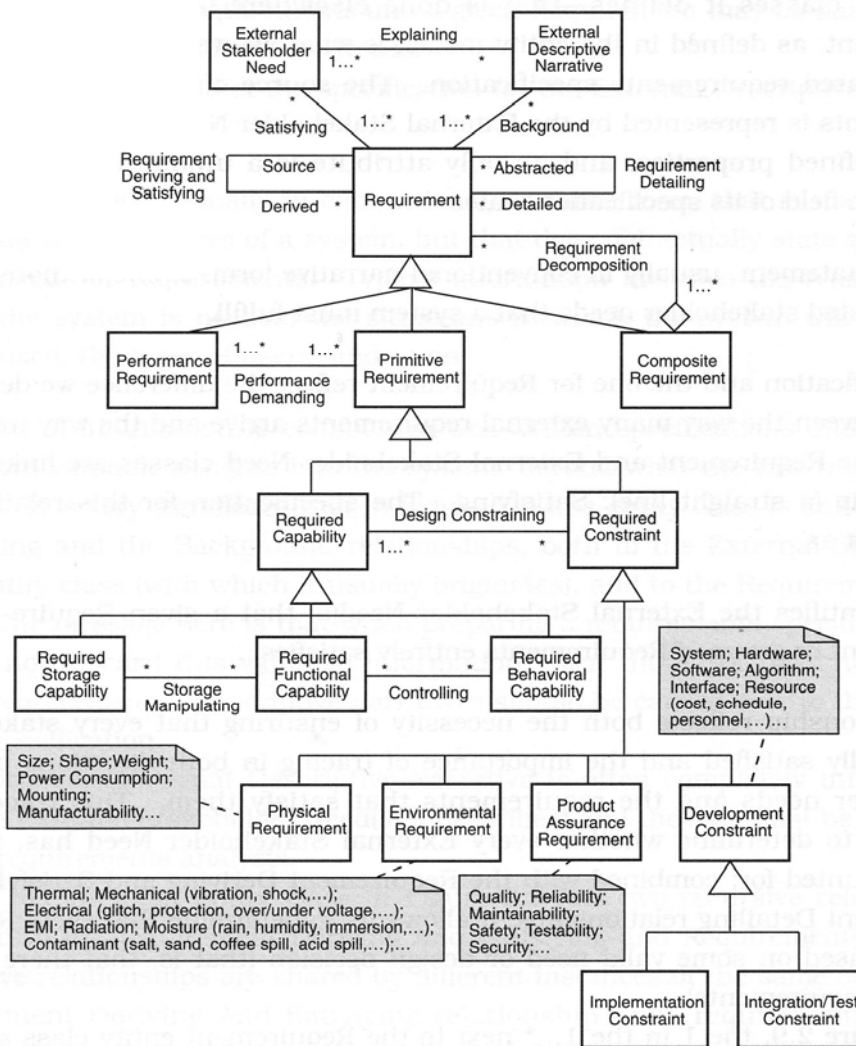


Figure A.5. Le modèle d'exigences selon PSARE.

Comme l'exprime ce schéma (qui est un diagramme de classes UML), la définition qu'ils proposent d'une exigence est la suivante : une exigence est soit simple soit composite (c'est-à-dire un agrégat d'exigences simples). Une exigence simple est soit une « aptitude requise » soit une « contrainte requise ». Il existe trois sortes d'aptitudes requises : les aptitudes de stockage, les aptitudes fonctionnelles et les aptitudes comportementales. Cette trichotomie des aptitudes requises rappelle une trichotomie déjà en place dans la méthode SA-RT de Hatley et Pirbhai : les datastore, les transformations de flux et les transformations de contrôle. A côté des aptitudes requises, les contraintes requises sont censées rendre compte soit des exigences physiques imposées au système (comme les exigences de forme, de taille ou de masse, ..), soit des exigences imposées au cycle de vie du système (comme les exigences de conception, de fabrication, d'intégration, d'assurance qualité, ..).

A chaque exigence simple est associée une ou plusieurs exigences de performance, c'est-à-dire des objectifs quantitatifs associés.

Hatley et Hruschka introduisent ensuite, au chapitre 3, ce qu'ils désignent comme un modèle d'architecture et qui permet de répartir les fonctions d'un système selon cinq catégories. Cette répartition est illustrée sur le schéma suivant :

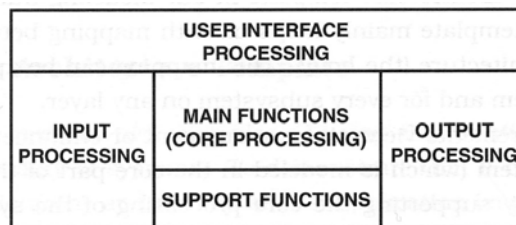


Figure A.6. *Le modèle d'architecture selon PSARE.*

Ce modèle d'architecture introduit cinq catégories d'activités réalisées par un système :

- Au cœur du système, les fonctions principales (core processing) du système, celles qui sont la raison d'être du système et en justifient le développement puis le maintien en opération,
- A la périphérie, quatre catégories de fonctions de traitement des entrées et des sorties ainsi que les fonctions de support et d'interfaçage avec les utilisateurs du système.

A partir de ce modèle d'architecture, Hatley et Hruschka proposent une nouvelle répartition selon la nature des flux traités : matières et énergies en infrastructure et informations en superstructure. Cette nouvelle partition permet préciser les types d'activités couvertes par chaque catégorie en fonction de la nature des flux.

Ainsi le cœur du système, pour ce qui est de sa dimension traitement de l'information va assurer des activités de transformation et de mémorisation de l'information mais aussi des activités de décision. Pour ce qui est de sa dimension traitement de flux de matières et d'énergie va assurer des activités de transformation et de stockage des matières et des énergies.

A la périphérie, pour ce qui est des fonctions de traitement des entrées et des sorties, le système va assurer des fonctions d'encodage et de décodage de l'information et des fonctions de conversion de la matière et de l'énergie.

Cette spécialisation des activités selon la nature des flux est figurée ci-dessous :

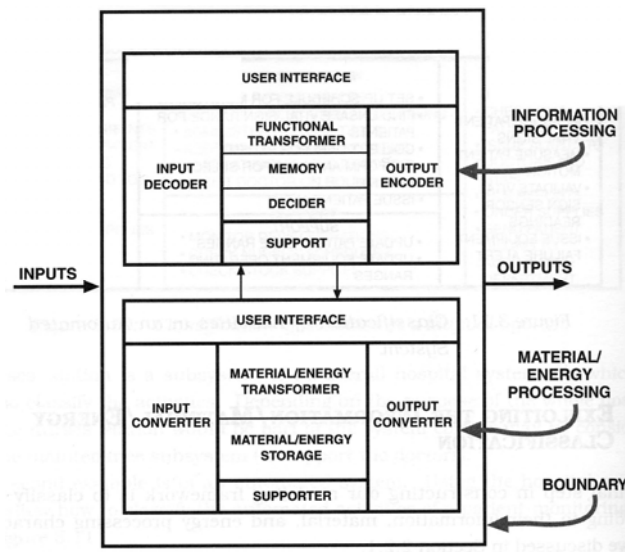


Figure A.7. Bi-partition modèle d'architecture en fonction de la nature des flux selon PSARE.

Au chapitre 4, Hatley et Hruschka proposent un ensemble de modèles de développement des systèmes basés sur le modèle d'architecture précédent.

Le schéma ci-dessous recense les différents types de modèles que PSARE déploie pour le développement de systèmes.

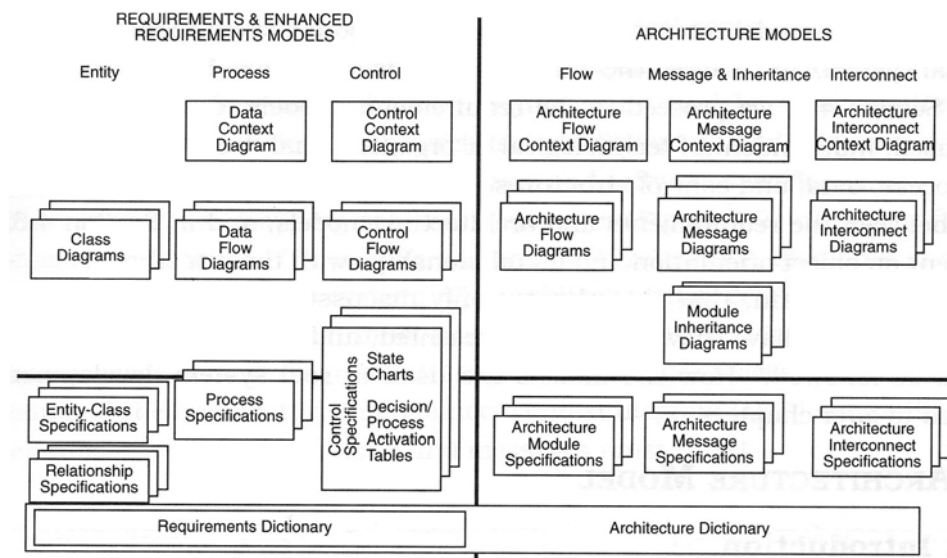


Figure A.8. Modèles de développement d'un système selon PSARE.

La ligne verticale figurée sur la partie médiane du schéma marque la séparation entre d'une part les modèles dits de spécification et d'autre part les modèles dits d'architecture. Dans chacune de ces deux parties, trois zones sont perceptibles sur le schéma, de bas vers le haut, des dictionnaires (d'exigences

pour la partie gauche et d'architecture pour la partie droite), au milieu des spécifications qui sont des descriptions textuelles et en haut des diagrammes. On trouve donc ici, comme moyens mis à notre disposition, des **dictionnaires**, des **spécifications textuelles** et des **diagrammes**.

Arrivés à ce point, les auteurs, curieusement⁵⁵, commencent par décrire les modèles utilisés pour décrire l'architecture physique d'un système.

Au niveau macroscopique du système, trois diagrammes de contexte permettent de représenter (1) le système physique et ses liaisons matérielles avec le reste du monde (Architecture Interconnect Context Diagram-AICD), (2) le système physique et ses échanges physiques (matière et énergie) avec son environnement (Architecture Flow Context Diagram-AFCD), (3) le système physique et ses échanges d'informations avec son environnement (Architecture Message Context Diagram-AMCD).

Aux niveaux intermédiaires du système, quatre types de diagrammes permettent de représenter (1) les sous-systèmes physiques et leurs liaisons matérielles avec leurs environnements respectifs (Architecture Context Diagrams-ACDs), (2) les sous-systèmes physiques et leurs échanges physiques (matière et énergie) avec leurs environnements respectifs (Architecture Flow Diagrams-AFDs), (3) les sous-systèmes physiques et leurs échanges d'informations avec leurs environnements respectifs (Architecture Message Diagrams-AMDs), (4) un quatrième type de diagrammes vient se surajouter pour décrire des relations d'héritage entre modules d'architecture (Module Inheritance Diagrams-MIDs).

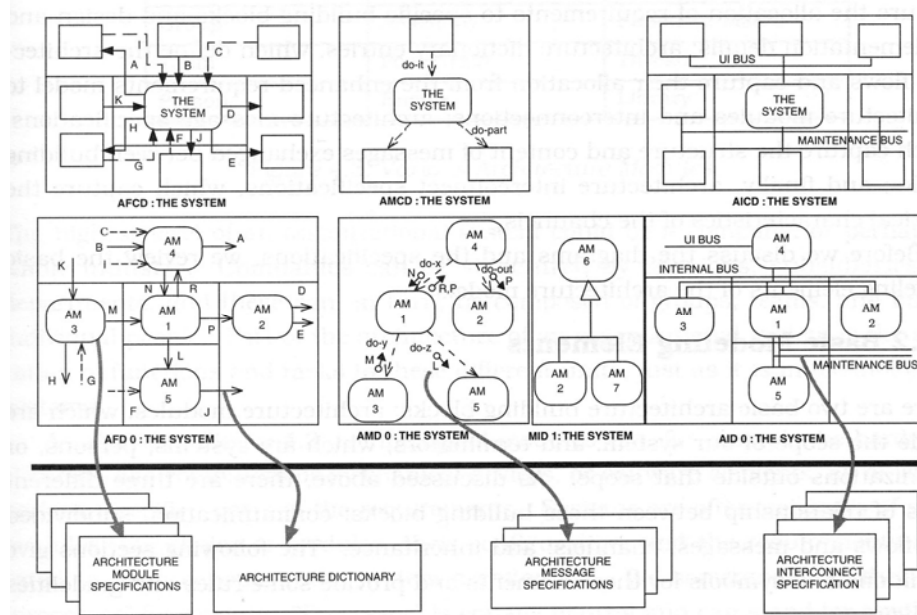


Figure A.9. Modèles associés à l'architecture physique d'un système selon PSARE.

A l'ensemble de ces éléments graphiques sont associées d'une part un dictionnaire d'architecture et d'autre part des descriptions textuelles incluses dans des spécifications : Architecture {Module, Message, Interconnect} spécification.

⁵⁵ On peut en effet s'étonner du fait de présenter des modèles physiques avant les modèles fonctionnels. De même, dans le nom donné à la méthode (PSARE) l'acronyme de « System Architecture » (SA) précède celui de « Requirement Engineering » (RE) alors que méthodologiquement parlant RE, il y a préséance de RE sur SA.

Après cette description des modèles d'architecture physique des systèmes, les auteurs présentent ce qu'ils nomment le modèle d'exigences et qui est l'ensemble des modèles utilisés pour décrire entités et processus du système.

Sur le schéma ci-dessous, nous retrouvons trois types de diagrammes associés aux spécifications textuelles correspondantes.

- Les diagrammes classes-relations (ECD) destinés selon les auteurs à représenter les exigences de mémorisation (de l'information) et de stockage (des matières et de l'énergie).
- Les diagrammes de flux de données (DFD) destinés à modéliser les exigences relatives aux transformations et aux flux de matières et d'énergie et éventuellement d'information.
- Les diagrammes de flux de contrôle (CFD) destinés à modéliser les exigences de comportement du système.

Ces diagrammes reprennent des formalismes connus de UML (diagrammes de classes) pour les premiers diagrammes et de SA-RT pour les suivants.

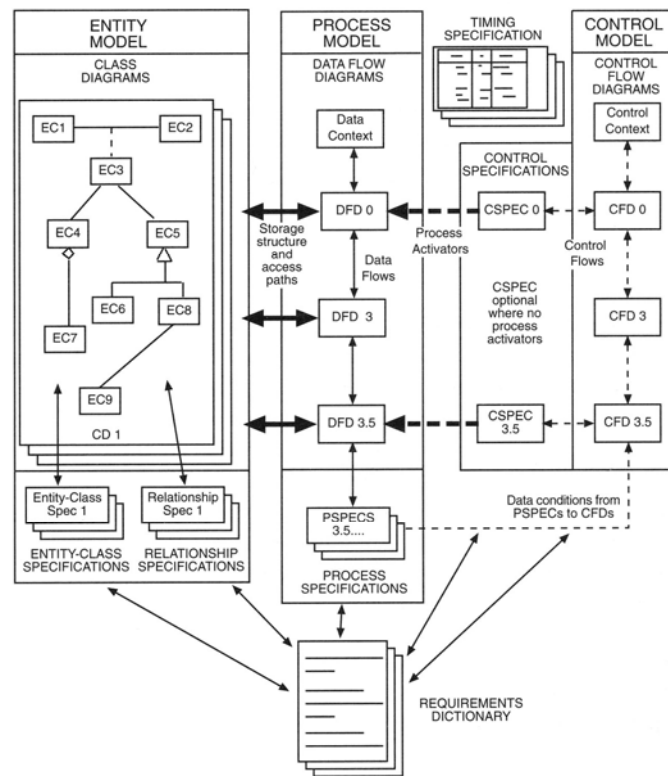


Figure A.10. Modèles associés aux exigences d'un système selon PSARE.

A partir de cette infrastructure de modèles graphiques et textuels destinés à couvrir la dimension « modèle d'exigences »⁵⁶ du système et la dimension de son architecture physique, les auteurs proposent, au chapitre 5, un processus de développement, c'est-à-dire une démarche pour produire l'architecture fonctionnelle et physique d'un système. Le schéma ci-dessous illustre le processus de développement proposé.

⁵⁶ Cette formulation empruntée aux auteurs nous paraît de nature à nourrir des confusions, la formulation adéquate nous paraît être « architecture fonctionnelle ».

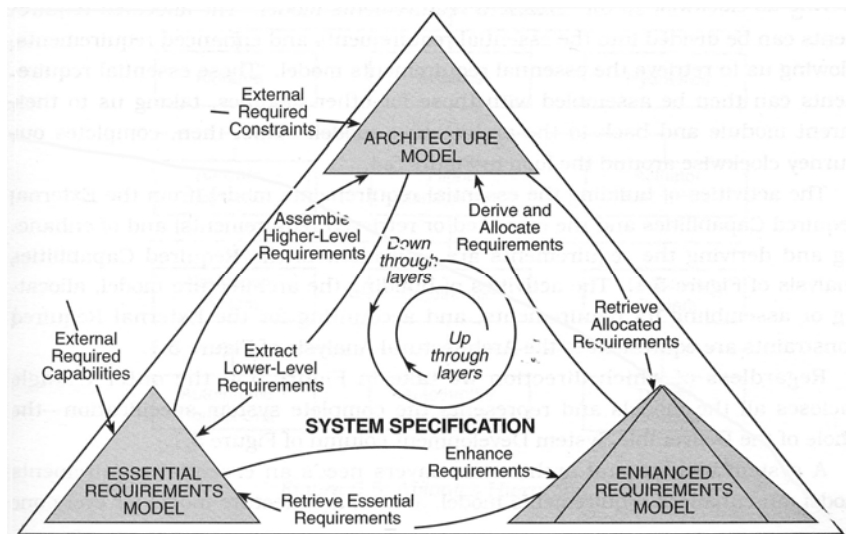


Figure A.11. Représentation du processus de développement d'un système selon PSARE.

Selon les auteurs de PSARE, le processus de développement d'un système doit être vu comme un mouvement tournant autour du centre de gravité d'un triangle aux sommets duquel se trouvent disposés trois modèles distincts du système :

- Le modèle des exigences essentielles,
- Le modèle des exigences augmentées,
- Le modèle d'architecture physique.

Au cours de ce mouvement tournant, un tour complet dans le sens rétrograde, correspond à un mouvement descendant (top-down) du passage d'un niveau système aux sous-systèmes qui le constituent alors que le mouvement direct correspond à un mouvement ascendant (bottom-up) du passage d'un niveau sous-systèmes au niveau système qui les englobent. Pour filer plus avant la métaphore, on pourrait décrire ce processus comme analogue à celui qui permet d'enfoncer une vis dans une pièce de bois (ici, une rotation rétrograde) ou de l'en retirer (une rotation directe)

Ainsi, PSARE tisse à chaque niveau de conception des liens étroits entre les trois modèles évoqués et rompt par conséquent avec l'idée très largement répandue selon laquelle la conception fonctionnelle pourrait être développée préalablement et indépendamment de la conception physique d'un système. Au contraire l'interdépendance de trois modèles à chaque niveau de la structure de décomposition du système est affirmée, comme l'illustre le schéma ci-dessous.

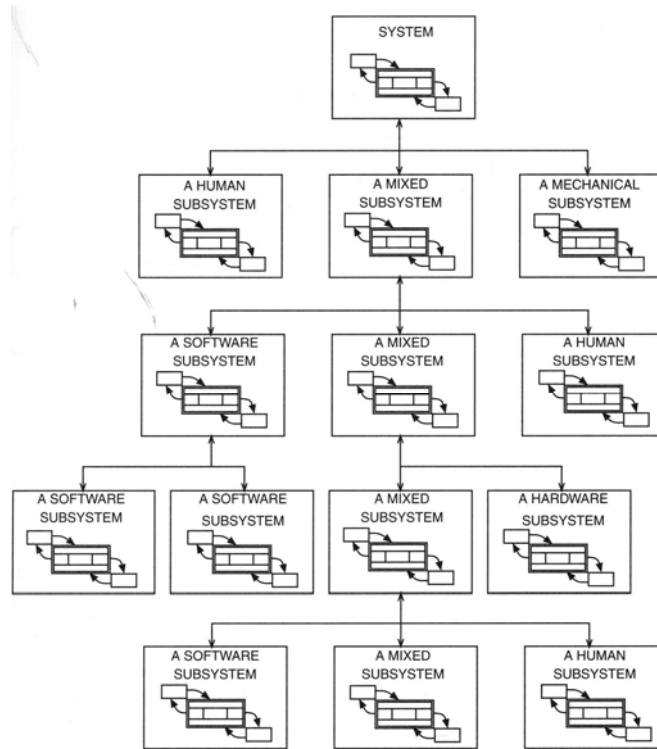


Figure A.12. Structure de décomposition d'un système et modèles associés selon PSARE.

Chaque nœud de ce schéma représente un sous-système du système racine. Chacun d'eux est porteur des trois modèles évoqués (exigences essentielles, exigences augmentées et architecture physique).

Le schéma ci-dessous illustre les liaisons entre ces différents modèles pertinents pour chaque sous-système :

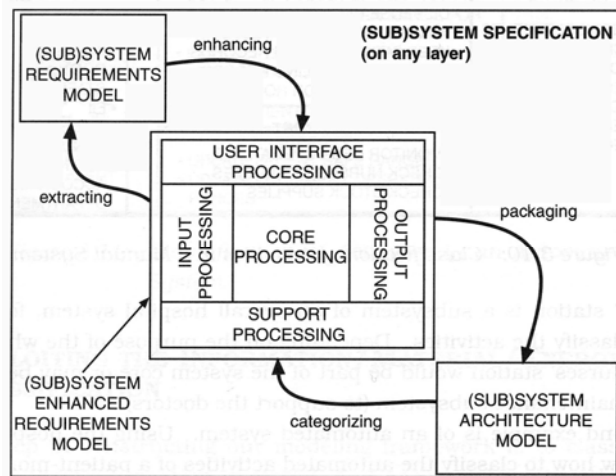


Figure A.13. Modèles associés à un sous-système selon PSARE.

Annexe 2.2 Sagace



La méthode Sagace (O[PEN 94], *Sagace : la modélisation des systèmes dont la maîtrise est complexe*, ILCE, 1994) et ([PEN 97], *La modélisation par les systèmes en situations complexes*, thèse Paris-Sud Orsay, 1997) a été développée par un chercheur du CEA, Jean Michel Penalva, dans le courant des années 90.

Le courant systémique a exercé au cours de ces dernières années, en France au moins, une telle fascination et un ascendant intellectuel voire une « *hégémonie idéologique* » sur le public et les professionnels, qu'il suffit d'accoler le qualificatif « *système* » à une construction abstraite pour en signifier l'excellence.

Cette méthode nous paraît digne d'intérêt à deux titres, au moins :

- Il s'agit d'une méthode qui ne naît pas dans le giron du génie logiciel pour ensuite dériver vers les systèmes hybrides (matériels et logiciels, discrets et continus) mais qui adresse d'emblée ces systèmes hybrides qu'il désigne sous le terme de systèmes complexes,
- Il s'agit ensuite d'un des rares cas, sinon le seul, d'une méthode d'ingénierie des systèmes qui se situe explicitement dans le courant de pensée systémique emmené notamment par Edgar Morin et Jean Louis Lemoigne, lequel courant prétend introduire un « *changement de paradigme*⁵⁷ » à la fois épistémologique et méthodologique.

Nous ne revenons pas ici sur les propositions épistémologiques du courant systémique français déjà évoquées ci-dessus, dans l'annexe 1.4 et auxquelles l'auteur de Sagace souscrit, semble-t-il, sans réserve⁵⁸.

En premier lieu, l'auteur de Sagace propose de regrouper l'ensemble des informations relatives à un projet dans un « référentiel » organisé autour de modèles où figurent à la fois le système conçu et l'organisation mise en place. « *La maîtrise d'un système s'inscrit dans une problématique de transfert de représentations entre différents acteurs humains* » transfert qui va des concepteurs pendant la phase de développement, aux utilisateurs pendant la phase d'exploitation puis aux experts pour le retour d'expérience.

Ensuite, l'auteur de Sagace introduit la notion de **points de vue** sur un système qui sont les différentes visions adoptées par les modélisateurs pour modéliser les propriétés essentielles d'un système.

- une vision **fonctionnelle** qui s'intéresse à ce que fait le système dans son environnement,
- une vision **organique** qui explicite ce qu'est le système en tant que réseau d'organes opérants
- une vision **opérationnelle** qui exprime ce que décide le système pour remplir sa mission,
- le système a ou doit avoir une **activité** lui permettant de réaliser ses objectifs selon des performances attendues,
- le système a ou doit avoir un **fonctionnement** régulier dans le temps en dépit des perturbations de l'environnement,
- le système a ou doit avoir une capacité d'**évolution** lui permettant maintenir sa cohésion structurelle notamment en cas de situation non désirée.

En introduisant ces trois visions et trois propriétés essentielles des systèmes finalisés, Jean Michel Penalva définit du même coup les neuf points de vue représentés sur la figure ci-dessous :

⁵⁷ Formule due à Thomas Khun in « Structure des révolutions scientifiques » souvent cité notamment par le courant systémique.

⁵⁸ « *La théorie du système général de J-L Le Moigne est le cadre général que nous avons décliné, afin de bénéficier de son argumentation, de sa cohérence et de sa grande richesse* » ([PEN 94], Préambule).

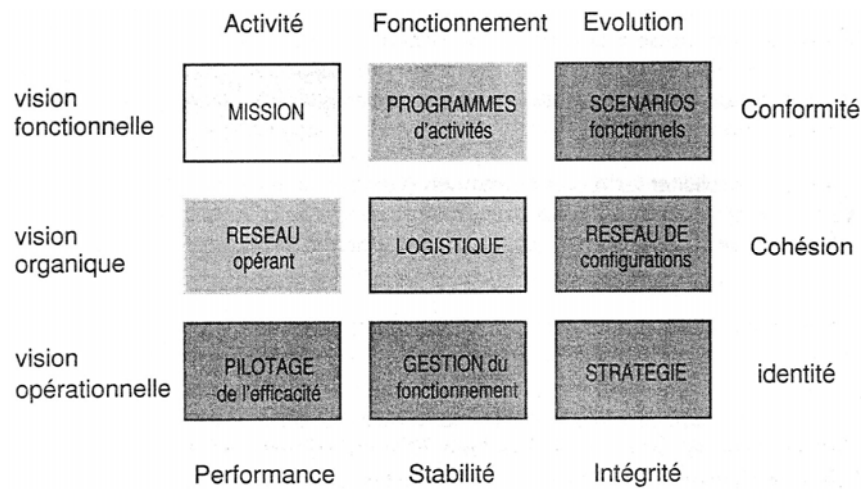


Figure A.14. Matrice des points de vue de modélisation d'un système selon SAGACE.

Ces neuf points de vue sont donc organisés, toujours selon J.M. Penalva, suivant trois perspectives (activité/performance, fonctionnement/stabilité, évolution/intégrité) et trois niveaux d'organisation (fonctionnel, structurel, comportemental).

La notion de **phase de développement** d'un système est ensuite introduite, par J.M. Penalva, comme un ensemble de règles normatives utilisables pour comprendre le comportement. Il s'agit d'abstractions de l'observateur construites pour interpréter le développement des capacités du système, fondé sur son aptitude à la réorganisation. Ainsi, « une phase apparaît donc souvent comme une propriété 'exogène' attribuée arbitrairement par le modélisateur » ([PEN 97], page 106).

Le langage Sagace que propose J.M. Penalva met en œuvre le motif de base suivant :

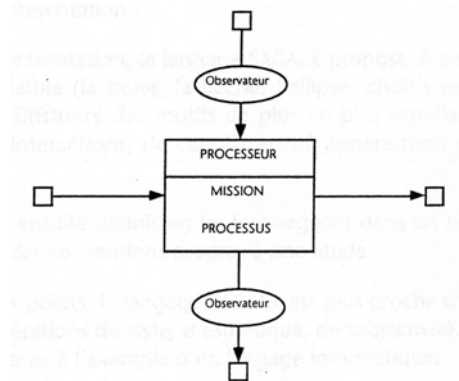


Figure A.15. Motif de base du langage SAGACE.

Il assure l'articulation de trois entités : processeur, flux et observateur. Le processeur effectue des transactions avec son environnement (axe horizontal) et est en interaction avec son milieu (axe vertical). Certaines caractéristiques de ces différents flux peuvent être appréhendés par des observateurs (flux).

Le langage Sagace propose ensuite de « construire des motifs de plus en plus signifiants ». La signification étant « achevée par le placement du motif dans un point de vue », la mise en perspective d'un diagramme dans un point de vue de la matrice Sagace permet de lui donner un sens précis.

Ainsi le diagramme suivant, inscrit dans le point de vue fonctionnel décrivant la mission d'un système, peut être interprété comme une spécification fonctionnelle :

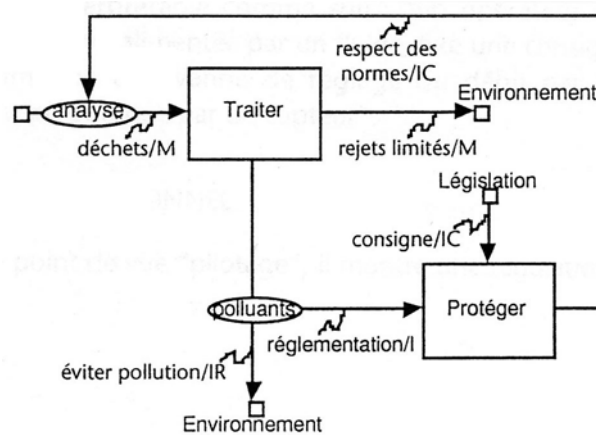


Figure A.16. Diagramme fonctionnel SAGACE.

Tandis que le diagramme qui suit, inscrit dans le point de vue organique, explicite la rétroaction qu'exerce un dispositif de régulation et peut être interprété comme une spécification organique :

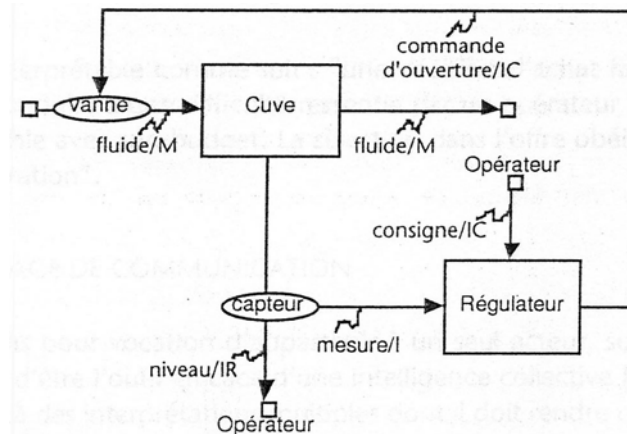


Figure A.17. Spécification organique SAGACE.

Dans le langage Sagace, un processeur représente donc :

- une action, un service, une activité dans la vision fonctionnelle,
- un ensemble de ressources qui, soit participe directement à l'action, soit supporte l'organisations des activités, soit forme un agencement dans la vision organique,
- un contexte, c'est-à-dire une représentation de l'activité du système nécessaire à une logique d'action, dans une vision opérationnelle.

Le symbole du flux est utilisé pour la représentation des relations du système avec son environnement. Les flux sur l'axe horizontal expriment les transactions du processeur avec son environnement, tandis que l'axe vertical est réservé aux interactions qui conditionnent l'activité.

Un observateur traduit la capacité à appréhender une caractéristique d'un flux, pour la prescrire (effecteur), l'observer (indicateur) ou encore mesurer une quantité (capteur).

En plus de cet ensemble de moyens de modélisation, la méthode Sagace propose une démarche de modélisation qui est un processus de conception/construction de modèles appelé Systémographie (terme emprunté à Le Moigne).

Pour Sagace, l'étude d'une situation comporte trois processus bien distincts :

- (1) la conceptualisation de la situation,
- (2) l'étude système qui vise à produire une vision cohérente de sa Fonction, de sa Structure et de son Comportement. Elle est constituée d'un cadrage qui décline la situation et le projet sous leurs différents aspects, d'une activité de systémographie,
- (3) l'investigation du système.

En ce qui concerne l'étude système (processus 2), le cadrage vise à déterminer le système à concevoir, opération qualifiée de spécification générale qui permet d'en fixer la finalité et le profil de mission. Il est souvent nécessaire de substituer à la vision globale une représentation en réseau de sous systèmes puis de focaliser l'étude sur une partie du réseau. La systémographie, quant à elle, vise l'articulation des entités dans les diagrammes de composition choisis en fonction des points de vue.

L'activité de systémographie proprement dite consiste en une description détaillée obtenue par approfondissement de chaque point de vue.

L'investigation système (processus 3), elle consiste en un approfondissement du modèle par la production d'une vue détaillée des entités du modèles, une classification des éléments du modèles sous la forme de taxonomies et d'une activité de croisement des points de vue dans le but de représenter des connaissances liées aux associations (réseaux sémantiques) entre entités de différents points de vue.

La démarche Sagace s'appuie sur un outil informatique qui, à notre connaissance, n'est plus commercialisé à ce jour, et qui propose pour l'étude système et l'investigation système les trois éditeurs représentés sur la figure suivante.

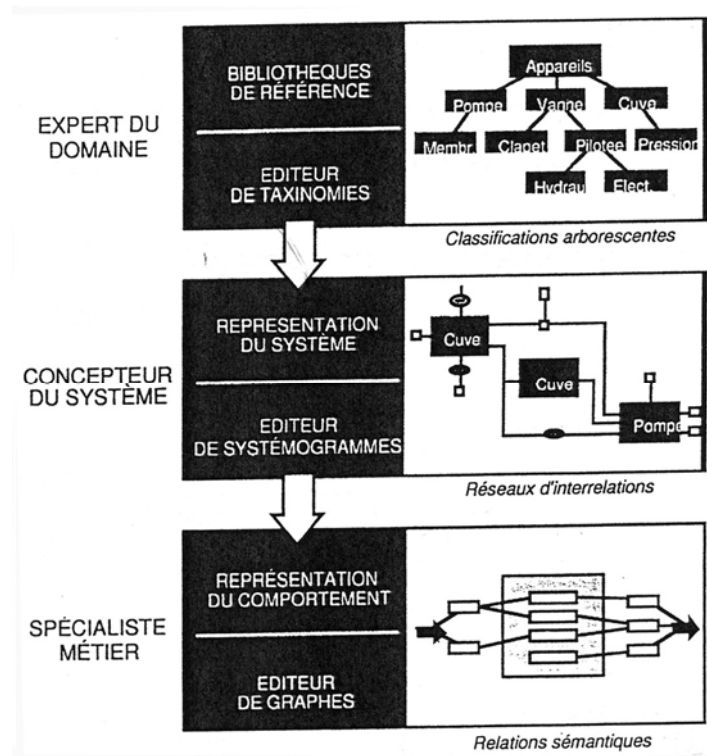


Figure A.18. Les outils du Systémographe SAGACE.

Annexe 2.3 Le langage de modélisation des systèmes – SysML

Annexe 2.3.1. UML, l'OMG, L'INCOSE et l'Ingénierie des Systèmes

L'Object Management Group (OMG) est un consortium international (créé par un ensemble d'entreprises en 1989) qui s'est constitué autour de l'interopérabilité des outils utilisant la technologie objet. Cet objectif a conduit l'OMG à élaborer, à adopter et à faire évoluer les spécifications d'un langage unifié de modélisation : Unified Modelling Language (UML) et d'une architecture et d'une infrastructure de communication permettant à des applications de collaborer à travers les réseaux : Common Object Request Broker Architecture (CORBA).

Si les questions prises en compte par les spécificateurs UML ont été pendant une longue période des questions liées à l'ingénierie du logiciel, des utilisateurs ont vu dans l'ingénierie de systèmes un nouveau champs d'application de cette notation qui a, en l'espace de quelques années, très largement pesé et homogénéisé le monde du logiciel.

Il y aurait évidemment de multiples avantages à ce qu'une notation commune s'impose dans le domaine de l'ingénierie de systèmes plutôt que de voir une prolifération d'idiomes et de dialectes tous incompatibles entre eux, cela pour le plus grand désagrément des utilisateurs.

Toutefois, il convient d'évaluer, si dans sa version courante, UML permet de donner forme aux concepts fondamentaux de l'ingénierie des systèmes et si des discours marketing un peu trop empressés

n'ont pas tendance à gommer la spécificité de l'ingénierie de systèmes et à assimiler sans beaucoup de pertinence ingénierie de systèmes et ingénierie du logiciel.

La réponse à cette question a été donnée par l'INCOSE, qui en 2001, a formulé un ensemble d'exigences à satisfaire par UML pour pouvoir être utilisé de façon pertinente dans le domaine de l'ingénierie de systèmes.

Depuis, un processus de coopération a été engagé entre l'INCOSE et l'OMG en vue de définir un langage de modélisation standard d'ingénierie des systèmes. La maîtrise d'œuvre de ce processus appartient au Systems Engineering Domain Special Interest Group (SE DSIG) de l'OMG dont les missions incluent :

- La production d'un langage standard de modélisation pour l'ingénierie des systèmes permettant de spécifier, de concevoir et de vérifier des systèmes complexes,
- Faciliter l'intégration des disciplines de l'ingénierie du système et de l'ingénierie du logiciel,
- Promouvoir la rigueur dans le transfert d'informations en disciplines et outils pour le développement de systèmes.

Annexe 2.3.2. Le RFP UML for SE de l'OMG

Après une demande d'information (Request for Information⁵⁹) début 2002, le SE DSIG, a émis un appel à propositions (Request For Proposal) en mars 2003 (accessible à l'adresse <http://syseng.omg.org/>).

Ce RFP spécifie, dans son chapitre six, les exigences particulières auxquelles devra répondre le langage de spécification des systèmes UML for SE. La section 6.5 spécifie les aptitudes de modélisation obligatoires (mandatory capabilities) tandis que la section 6.6 est consacrée aux aptitudes optionnelles. Parmi les exigences obligatoires, on peut noter en tout premier lieu le grand retour de la notion de **fonction** (exigences 6.5.2.1 à 6.5.2.3) au sein de la communauté UML⁶⁰. Les notions de **flux continu** de **matière**, d'**énergie** et d'information devront également être implémentée à cotée des flux discrets d'information familiers en logiciel. Une implémentation du concept d'**exigence** est également attendue (exigences 6.5.4) ainsi que celle d'**allocation**.

⁵⁹ Une RFI entre dans un processus courant d'acquisition aux USA et peut (si le besoin est confirmé) être suivi d'une RFP (Request For Proposal). C'est le processus adopté en la circonstance.

⁶⁰ Après plus d'une décennie d'ostracisme, ce qui ne manque pas de saveur pour ceux qui ont traversé les querelles du monde du logiciel entre les tenants de l'approche fonction et ceux de l'approche objet.

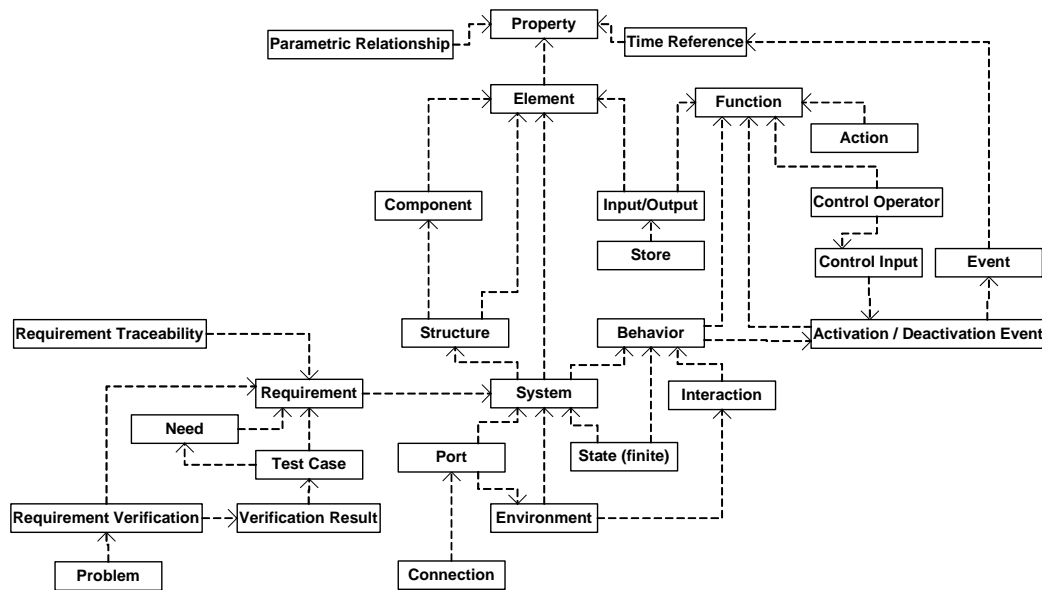


Figure A.19. Concepts à implémenter par UML for SE.

Au chapitre des exigences optionnelles, une implémentation du concept d'analyses et d'études de **compromis** (trade-off studies and analysis) est également souhaitée (exigences 6.5.4). De même, les notions d'**arbre de décisions**, d'**alternatives de conception** ne figurent que dans la partie optionnelle.

Annexe 2.3.3. Le langage de modélisation SysML



SysML est un langage de modélisation des systèmes en cours de spécification [SML 06] est accessible aux adresses <http://www.sysml.org/> et <http://syseng.omg.org/>.

Le langage SysML constitue la réponse d'un groupement international d'entreprises⁶¹ à l'appel à propositions (RFP) émis par le DSIG de l'OMG que nous avons évoqué ci-dessus.

Comme l'usage en est acquis par la communauté UML depuis sa constitution, l'effort d'harmonisation porte exclusivement sur la notation, le langage de modélisation. Les questions de processus, de démarche, de méthodes en d'autres termes ne sont pas abordées. La question du processus de modélisation est confiée aux utilisateurs du langage eux-mêmes qui doivent soit s'en charger eux-mêmes soit s'adresser à un tiers. Ainsi le RUP (Rational Unified Process) est sans doute le processus de mise en œuvre du langage UML le plus connu.

Cette séparation entre le langage de modélisation et les usages qu'on en fait, pour audacieux et non trivial qu'il puisse paraître à des méthodologues, a eu au moins un mérite : mettre d'accord l'ensemble d'une communauté professionnelle (celle des ingénieurs du logiciel) sur les traits d'un langage de modélisation et donc confiner la compétition à la seule mise en œuvre du langage afin qu'elle ne nuise pas au développement des affaires.

⁶¹ Incluant, entre autres, BAE Systems, Boeing, EADS Astrium, Isreal Aircraft Industries, Lockheed Martin Corporation, Motorola, Northrop Grumman, Raytheon, Thales, NASA/JPL, NIST, DOD, IBM, I-Logix, Telelogic.

Ainsi SysML n'est pas une méthode d'ingénierie des systèmes mais seulement une infrastructure pour le développement de telles méthodes qui partageront un langage commun. En ce sens, le projet de développement de SysML est un projet modeste.

D'autre part, ce projet de définition du langage de modélisation SysML s'apparente à un projet de traduction d'un corps de connaissances, exprimé dans un langage source, dans un langage cible.

Ce corps de connaissances peut être assimilé au réseau sémantique des notions utilisées par les ingénieurs système lorsqu'ils réalisent les processus du cycle de vie d'un système technologique. Le réseau sémantique, représenté sur la figure A.19., inclut des concepts comme 'exigence', des relations comme 'satisfait' et propose un univers structuré du discours de l'ingénierie système.

Le langage cible n'est autre que le langage UML version 2.0 (accessible à l'adresse <http://www.uml.org/>). Ce langage offre un certain nombre de mécanismes d'extensions lui permettant éventuellement de s'adapter à des situations nouvelles.

Le projet SysML est donc soumis à de multiples contraintes parmi lesquelles celles de :

- mettre d'accord un ensemble de parties prenantes, aux intérêts pour partie convergents et pour partie antagonistes, à propos d'une traduction qui
- prenne en compte le plus exactement possible un corpus de connaissances des ingénieurs système tel que se l'est représenté le SE DSIG de l'OMG,
- tout en se moulant, autant que possible, dans les cadres conceptuels d'un langage qui n'avait pas été conçu à l'origine pour rendre compte de ce corpus.

La figure ci-dessous représente, sous une forme imagée, les domaines de définition respectifs de UML 2 et de SysML. On peut observer une zone de recouvrement, celles des notions de l'univers du discours des ingénieurs système qui trouvent une correspondance directe en UML 2.0.

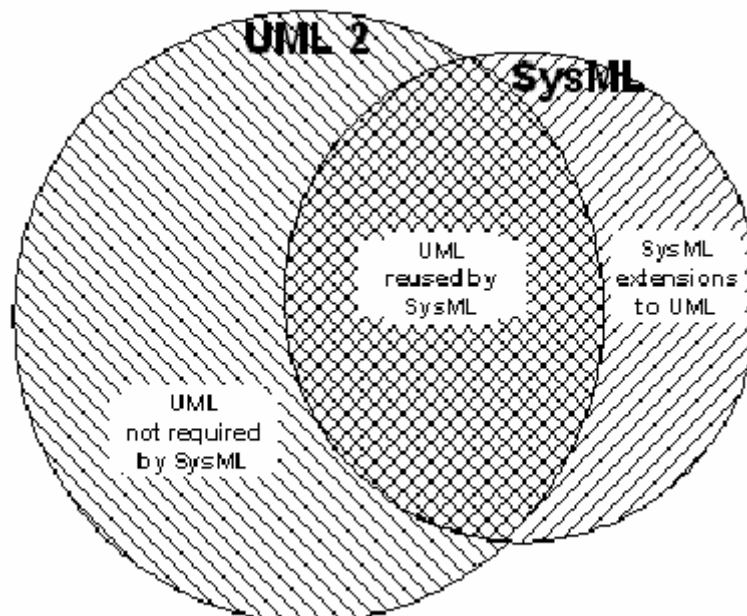


Figure A.20. Domaines de définition de UML 2 et de SysML

On peut également observer une zone de non recouvrement, celle des notions de l'univers du discours des ingénieurs système qui ne trouvent pas de correspondance directe en UML 2.0. Le projet SysML navigue entre plusieurs écueils notamment celui de mécontenter les deux communautés concernées. Toutefois, comme ce fut le cas pour le projet UML, compte tenu non seulement des intérêts économiques en jeu mais également de la dynamique rationalisatrice de nos sociétés, on peut penser que le projet SysML s'imposera sous une forme ou sous une autre. Dans l'immédiat, il apparaît que celui-ci se situe dans sa jeunesse, au point de départ d'un long processus de maturation.

Annexe 3 : Les cinq genres de systèmes concrets selon Mario Bunge

Nous faisons notre la hiérarchie des systèmes proposée par Mario Bunge [BUN 79].

Pour ce dernier, il existe, au stade d'évolution de notre univers⁶², cinq genres de systèmes. Le monde réellement existant étant une construction de ces cinq genres de systèmes que l'on peut représenter sous la forme d'une pyramide tronquée. Cette pyramide possède actuellement cinq strates représentant les cinq genres de systèmes concrets. Une représentation de notre univers dans sa jeunesse n'en aurait possédé vraisemblablement pas plus de deux (systèmes physiques et chimiques) et dans le futur, ce nombre variera encore.

Les systèmes chimiques sont d'abord des systèmes physiques, avant, pendant et après le cycle de leur vie. Les systèmes biologiques émergent à partir des systèmes chimiques, c'est-à-dire que les constituants des systèmes biologiques sont des systèmes physico-chimiques. Pendant leur durée de vie ils possèdent des propriétés qualitativement différentes des systèmes chimiques qui les composent. Selon le biologiste Francisco Varela [VAR 89] ces systèmes biologiques ont pour propriété essentielle l'autopoïèse, c'est-à-dire la capacité à s'auto produire (avant même celle de se re-produire). Les psycho-systèmes sont une variété particulière de systèmes biologiques dotés de systèmes nerveux centraux. Les systèmes sociaux organisent certains systèmes biologiques. Ceci ne signifie pas que tous les systèmes biologiques précèdent chronologiquement dans l'évolution, les systèmes sociaux. Des sociétés animales ont précédé de façon certaine l'apparition de biosystèmes particuliers, le biosystème humain par exemple. Nous savons au contraire [LER 64] que les groupes humains (systèmes sociaux) sont le résultat d'une évolution de systèmes sociaux de préhominiens concomitante d'une évolution des systèmes psycho-biologiques qui les composaient (émergence de homo sapiens).

⁶² Mario Bunge considère que ce nombre varie effectivement, par apparition ou disparition de genres de systèmes.

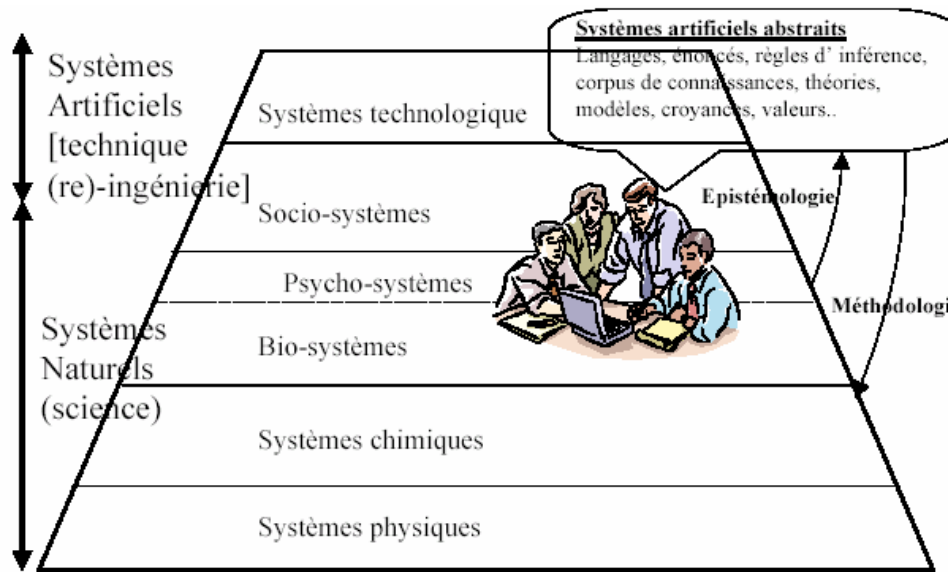


Figure A.21. Notre univers : un univers de systèmes, selon M. Bunge.

Ainsi, cette disposition figurative vise à signifier que les systèmes de genre $g+1$ ont pour composition et pour environnement des systèmes de niveau égal ou inférieur à g .

Annexe 3.1 Les systèmes physiques

A la base de la pyramide se trouvent les **systèmes physiques**. Ces systèmes physiques forment les fondations du monde. Ils sont composés d'objets concrets en **interaction physique** (et que nous essayons de traduire en termes mécanique, électrique, magnétique, thermique) avec un environnement également constitués d'objets concrets.

Annexe 3.2 Les systèmes chimiques

Sur ces fondations, se constituent les **systèmes chimiques**, encore nommés **réacteurs chimiques**, qui sont des systèmes physiques, sièges d'**interactions chimiques** internes et avec le milieu environnant. Un exemple de système chimique déjà évoqué est celui d'un aérosol d'un carburant pendant sa combustion.

Il est représenté schématiquement par l'équation chimique : $C_7H_{16} + 11O_2 \rightarrow 7CO_2 + 8H_2O$. La

composition initiale du réacteur chimique (les réactants) est constitué d'une mole de C_7H_{16} pour 11 moles de O_2 tandis que les produits de la réaction (7 moles de CO_2 pour 8 moles de H_2O) constituent la composition finale du système. Ceci met en évidence (1) que les systèmes chimiques ont un cycle de vie, en dehors duquel ils cessent d'être des systèmes chimiques à moins de ses composants finals ne s'engagent à nouveau dans des réactions et (2) que leurs compositions internes varient pendant leurs cycle de vie sans que ces variations puissent être limités à des échanges avec l'environnement du système (comme c'est le cas pour les systèmes strictement physiques).

Annexe 3.3 Les systèmes biologiques

Le troisième genre de systèmes se constitue sur la base du précédent (les systèmes chimiques). Il s'agit des systèmes biologiques. La propriété émergente fondamentale de ces **systèmes biologiques** est la **vie**. Ils sont le siège d'**interactions biologiques**. Ces systèmes, bien qu'ils constituent le soubassement des systèmes sociaux n'entrent pas directement dans le périmètre d'intérêt de notre travail.

Toutefois, c'est bien au sein de ce genre de systèmes qu'apparaissent des espèces porteuses de propriétés émergentes telles que la perception, la mémoire, l'imagination, l'anticipation, la volonté et la pensée qui sont des propriétés nécessaires à la conception et à la production de systèmes techniques. Ces systèmes sont des bio-systèmes que nous qualifions d'**êtres raisonnables** et **créatifs**, c'est-à-dire des bio-systèmes capables de prendre des **décisions raisonnables**, tout en faisant preuve **de créativité**.

Nous définissons une décision raisonnable comme étant le choix d'un élément parmi un ensemble d'alternatives précédé par :

- une connaissance adéquate des alternatives,
- une évaluation correcte de ces alternatives,
- une anticipation des conséquences possibles de l'action correspondante.

et la créativité comme étant définie par la capacité :

- à discerner de nouveaux événements dans son environnement avant d'autres individus de son espèce,
- à inventer de nouveaux types de comportements avant d'autres individus de son espèce,
- à inventer de nouvelles constructions abstraites ou de nouveaux objets concrets avant d'autres individus de son espèce.

Annexe 3.4 Les systèmes sociaux

Le quatrième genre de systèmes se constitue sur la base du précédent (les systèmes biologiques). Il s'agit des **systèmes sociaux**. Ils sont le siège d'**interactions sociales**. La composition $\mathcal{C}(\Sigma)$ d'un tel système est un ensemble d'animaux de la même espèce. Son environnement $\mathcal{E}(\Sigma)$ est constitué de l'ensemble des objets concrets avec lesquels $\mathcal{C}(\Sigma)$ est en interaction. Enfin, sa structure $\mathcal{S}(\Sigma)$ est formé de l'ensemble liens sociaux (liens de parenté, par exemple) et des interactions entre composants du système $\mathcal{C}(\Sigma)$ (par exemple, les comportements associés aux systèmes de parenté ou encore les relations de pouvoir, de coopération et de solidarité existant entre les différents composants) et entre composants du système et son environnement $\mathcal{E}(\Sigma)$, comme la transformation de l'habitat naturel, la transformation de ressources naturelles en biens et outils.

Parmi les systèmes sociaux se distinguent les groupes humains et en particulier les sociétés humaines. Ces dernières se caractérisent par une autosuffisance (toutes les fonctions sociales indispensables sont assurées), de leur constitution à leur disparition tandis que les sous systèmes (groupes) humains n'assurent pas l'intégralité des fonctions sociales et sont donc contraints à recourir à d'autres groupes dont ils dépendent pour assurer le complément des fonctions sociales. L'entreprise, le service ou le projet constituent des groupes humains qui n'assurent qu'une partie des fonctions sociales assurées par la société humaine qui les englobe.

Une des caractéristiques des groupes humains est que leurs membres peuvent effectuer un **travail**, c'est-à-dire réaliser des activités de transformation d'objets concrets telles que ces transformations produisent des modifications appréciables de ces objets concrets lesquels acquièrent de la **valeur**, deviennent utiles ou dignes d'intérêt pour des membres du groupe (les mêmes ou d'autres).

De plus, ce travail fait le plus souvent l'objet d'une socialisation dans le cadre d'une division du travail social [DUR 93].

Notons que pour que l'activité de membres d'un groupe puisse être un travail est que son résultat ait de la valeur pour des membres du groupe, c'est-à-dire qu'il permette de satisfaire, au moins temporairement, un besoin, une demande ou un désir ressenti par ces derniers.

Dans les sociétés humaines, trois grands types de travaux peuvent être distingués :

- Le travail « manuel » qui concerne la production d'**artefacts concrets** (biens, produits, outils, ..) à partir de ressources naturelles et de produits semi-finis et de services associés à cette production.,
- Le travail « culturel » qui concerne l'action en direction des membres de la société ayant pour effet de modifier le bagage culturel (tant scientifique, que technique, artistique, ..) des membres de la société. Le résultat de ce travail « culturel » se traduit dans la production d'**artefacts abstraits**, que l'on pourrait présenter comme des corpus de connaissances et de croyances en relation,
- Le travail « politique » qui concerne l'action en direction des membres de la société ayant pour effet de contrôler et commander le travail « manuel », et le travail « culturel ». Il s'agit dans le premier cas de la direction de la production et dans le second de la direction de la culture.

Cette tri-partition du travail dans les sociétés humaines permet de mettre en évidence trois sphères ou trois sous systèmes des sociétés humaines : les sphères **économique**, **culturelle** et **politique**. Nous ne faisons ici aucune hypothèse sur le recouvrement total (comme dans les sociétés primitives) ou partiel ou au contraire la séparation de ces sphères (comme dans les sociétés connaissant une division sociale extrême du travail).