



PASCAL LE MASSON
BENOÎT WEIL
ARMAND HATCHUEL

Théorie, méthodes et organisations de la conception



Sciences de la Conception

Presses des Mines

Pascal Le Masson, Benoît Weil, Armand Hatchuel, *Théorie, méthodes et organisations de la conception*, Paris : Presses des MINES, collection Sciences de la Conception, 2014.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2014
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France
presses@mines-paristech.fr
www.pressesdesmines.com

© Couverture : Corentin Echivard
ISBN : 978-2-35671-151-9

Dépôt légal : 2014
Achevé d'imprimer en 2014 (Paris)
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

Théorie, méthodes et organisations de la conception

Collection Sciences de la Conception

Dirigée par Michel Nakhla

Dans la même collection :

Elsa Berthet

Concevoir l'écosystème, un nouveau défi pour l'agriculture

Marine Agogué, Sophie Hooge, Frédéric Arnoux, Ingi Brown

An Introduction to Innovative Design

Théorie, méthodes et organisations de la conception

Pascal Le Masson
Benoît Weil
Armand Hatchuel

REMERCIEMENTS

Un manuel de cours fait la synthèse de connaissances établies. Celui-ci ne fait pas exception. Mais dans le domaine de la conception, cette synthèse supposait aussi d'importants efforts pour ordonner, compléter et adapter aux enjeux contemporains un corpus pluridisciplinaire complexe. Ce manuel est ainsi le fruit d'un programme de recherche et d'enseignement lancé à l'École des Mines il y a plus de vingt ans. En 1994, l'École des Mines de Paris a créé une option consacrée à l'Ingénierie de la Conception. Sous cette dénomination peu courante à l'époque, une équipe d'enseignants fut réunie sous la responsabilité d'Armand Hatchuel. Elle comprenait Benoit Weil, Jean-Claude Sardas, et Christophe Midler, puis Pascal Le Masson quelques années plus tard.

Cette formation renouait avec une tradition séculaire de formation des ingénieurs à la conception, tout en abordant les enjeux contemporains de l'innovation. Elle voulait fédérer les enseignements sur l'innovation, la gestion de projet et la conception et, à terme, conduire les sciences de la conception à une maturité équivalente à celle des sciences de la décision ou de la programmation. En quelques années, ce programme a pris une accélération inattendue. L'ensemble des enseignements allait progressivement être réorganisé autour d'un même cadre théorique, la théorie C-K (Hatchuel 1996, Hatchuel et Weil 2001, 2009, etc.), enseignée aujourd'hui dans de nombreux établissements. Ce programme répondait aussi à une mutation importante : la nécessité de renforcer la capacité d'innovation des entreprises. Ces avancées ont ainsi permis de nouer des partenariats d'une grande qualité avec de nombreuses entreprises.

S'est ainsi constituée une plateforme de recherche et d'enseignement qui n'a cessé de croître, notamment avec la création en 2009 de la chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante, soutenue par cinq puis sept industriels et renouvelée en 2014 avec aujourd'hui plus d'une dizaine d'entreprises mécènes.

Les théories et les méthodes développées depuis vingt ans dans ce cadre sont venues progressivement enrichir un corpus déjà bien fourni, comprenant gestion de l'innovation, économie de l'innovation, engineering design, industrial design mais aussi, histoire, mathématiques et logique, sciences cognitives... Elles ont permis de constituer un enseignement synthétique et raisonné des théories, méthodes et organisations de la conception intégrant les apports de ces multiples disciplines. Plusieurs cours ont ainsi pu être créés. À l'École des Mines, dès 1999,

Vincent Chapel et Benoit Weil ont créé le cours de Conception de Produit et Innovation, développé ensuite avec Pascal Le Masson. En 2007 une version de ce cours était développée à destination des doctorants de ParisTech. Ces corpus ont été également mobilisés dans de nombreuses institutions, non seulement en Écoles d'ingénieur (par exemple Ponts et Chaussées, École Polytechnique, AgroParisTech, INSA, ENSAM, CNAM, etc.) mais aussi en École de Commerce (HEC, ESCP, Grenoble École de Management, etc.), dans les universités (Université Paris Dauphine, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, etc.) et dans les écoles de design (Strate College, ENSCI, etc.). Les cours ont été également été repris à l'étranger, avec des formations à la Chalmers School of Entrepreneurship, à Stanford, à Delft, au Carnegie Mellon, à Tel-Aviv, à Tokyo.

Nos remerciements vont d'abord à l'École des Mines pour le soutien qu'elle a accordé dès la première heure à ces programmes, et qui ne s'est pas démenti depuis. Nos remerciements vont aux enseignants de l'option Ingénierie de la Conception. Et tout particulièrement à Christophe Midler (CRG, École Polytechnique), qui a participé à l'option dès le premier jour et dont la contribution éminente a nourri ces travaux. À Maurille Larivière qui a remarquablement apporté l'expérience du design à nos travaux. À Blanche Segrestin, Franck Aggeri, Philippe Lefebvre, Michel Nakhla dont les contributions ont souvent servi de référence à notre recherche. À Marine Agogué, Akin Kazakçi, Sophie Hooge, Cédric Dalmasso, Mathieu Cassotti, Annie Gentes, Anne-Françoise Schmid, Georges Amar, qui ont rejoint l'équipe depuis quelques années et dont les travaux constituent des apports fondamentaux à l'Ingénierie de la Conception. De chaleureux remerciements à tous nos « optionnaires IC » dont les travaux de fin d'études ont été des sources de progrès et de motivation pour les enseignants.

Nous remercions aussi Yacine Felk, Ingi Brown, Olga Kokshagina, Pierre-Antoine Arrighi, Elsa Berthet, Frédéric Arnoux, Aytunc Ün, Hassen Ahmed dont les thèses ou les mémoires de master ont constitué des avancées remarquables pour les sciences de la conception et dont les travaux ont très largement alimenté cet ouvrage.

Mais ce livre n'aurait pas été possible sans le soutien de nombreux partenaires dans les entreprises qui soutiennent la chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante. Notre reconnaissance va tout spécialement à Dominique Levent, Philippe Doublet, Lomig Unger, Pascale Nays, Rémi Bastien (Renault), Dominique Laousse, Eric Conti, Jean-Jacques Thomas, Patrice Aknin, Cédric Brogard (SNCF), Guillaume Lapeyronnie, Denis Bonnet, Christian Delaveau, Joseph Huisseun, Philippe Benquet (Thales), Pascal Daloz, Patrick Johnson, Anne Asensio, Manuel Gruson (Dassault Systèmes), Patrick Cogez, Jean-Luc Jaffard, Loïc Liétar, Jean-Marc Chéry (ST-Microelectronics), Laurent Delattre,

Céline Sches, Nicolas Bréziat, Alain Dieulin (Vallourec), Stéphane Cobo, Pierre Becquart, Paul Gardey de Soos (RATP), Michel Comes, Jérôme Javelle, Thierry Pardessus, Thierry Chevalier, Frédéric Barrois (Airbus), Denic Clodic (Ereie), Vincent Chapel et Jean-Pierre Tetaz (Helvetia-Environnement), Hervé Le Lous (Vivasanté), Isabelle et Michel Lescanne (Nutriset-Onyx).

Ces enseignements ont aussi beaucoup bénéficié de l'expérience des consultants qui ont déployé ces méthodes, Yvon Bellec (TAKT) qui a été le premier à se lancer dans l'aventure des KCP, Patrick Morin, Patrick Corsi.

Pour avoir accepté de venir témoigner et partager leur expérience avec nos étudiants nous remercions Jean-Hervé Poisson (Renault), Nils Saclier (Renault), Bernard Vaudeville (T/E/S/S), Simon Aubry (T/E/S/S), Yves Parlier (Beyond the Sea), Marc Maurer (Saint-Gobain), Jean Schmitt (Jolt Capital), Hervé This (INRA), Benjamin Duban, Eric Carreel (Withings), Laurent Levy (Nanobiotix), Nicolas Bergerault (L'atelier des chefs), Charlotte Leleu (Regimbeau), Philippe Picaud (Carrefour), François Pouilloux et Stéphanie Jacquemont (Ixxo), Jean-Louis Lievin (Idexlab).

À Olivier Houdé (Sorbonne), Albert David (Université Paris dauphine), Gilles Garel (CNAM), Sylvain Lenfle (CRG, École Polytechnique), Olivier Hirt (ENSCI), Améziane Aoussat (ENSAM), Patrick Llerena (Beta Université de Strasbourg), Patrick Cohendet et Laurent Simont (HEC Montréal), Sanne Ollila, Maria Elmquist, Tobias Fredberg, Anna Yström et Mats Lundqvist (Chalmers University), Carliss Baldwin (Harvard Business School), Ellen O'Connor (Stanford University), Victor Seidel (University of Oxford), Alan Mac Cormack (MIT), Rafael Ramirez (Oxford Université), Annabelle Gawer (Imperial College), Francesco Zirpoli (University Ca'Foscari de Venice), Markus Becker (University of Southern Denmark), Franck Piller (Aachen RWTH), Yoram Reich (Tel Aviv University), Ade Mabogunje (Stanford University), Eswaran Subrahmanian (Carnegie Mellon), Chris Mac Mahon (Bristol University), Jean-François Boujut, Michel Tollenaere et Eric Blanco (Polytechnique Grenoble), Toshiharu Taura (Kobe University), Yukari Nagai (Tokyo University), Ken Starkey (Nottingham University), Ehud Kroll (Technion), Kathrin Möslin (Erlangen-Nürnberg Université), John Gero (Krasnow Institute for Advanced Sciences), Udo Lindemann (Technische Universität Munich), Patrick Fridenson (EHESS), Anne Françoise Garçon (Université Sorbonne) et Hélène Vérin pour leurs travaux et leurs stimulantes discussions.

De nombreux travaux ont pu se développer grâce aux séminaires et conférences organisés par des communautés scientifiques de référence : la Design Society, que nous remercions pour la création du SIG (Special Group of Interest) sur la Design Theory ; EURAM (European Academy of Management) qui

accueille régulièrement des sessions sur la Conception; IPDM (International Product Development Management) une communauté pionnière en gestion de l'innovation, dont nous remercions particulièrement le Président, Christer Karlsson et son board pour avoir accueilli avec bienveillance des travaux originaux sur la conception et l'innovation.

Enfin, à tous les chercheurs du Centre de Gestion Scientifique de l'École des Mines, nos plus sincères remerciements pour leur contributions. À Céline Bourdon, Stéphanie Brunet et Martine Jouanon pour leur aide toujours efficace.

Michel Nakhla a bien voulu accueillir ce livre dans sa collection et a suivi de près sa conception, qu'il en soit ici remercié.

Paris, janvier 2014.

Les auteurs

CHAPITRE INTRODUCTIF

MODÈLE CANONIQUE DES RÉGIMES DE CONCEPTION

INTRODUCTION : FORMER À LA CONCEPTION AUJOURD'HUI

En 1993 était créé à l'École des Mines un nouveau cursus Ingénierie de la Conception. Il correspondait à une double nécessité : préparer les futurs ingénieurs aux mutations à l'œuvre dans l'organisation de l'innovation dans les grandes entreprises ; et développer un cursus de formation intégrant les plus récentes avancées en termes de théories et de méthodes de conception. Développée en partenariat avec les grandes firmes innovantes et adossée à un programme de recherche portant sur la gestion des activités de conception, cette formation a conduit à structurer progressivement un ensemble de cours originaux traitant des théories, des méthodes et des organisations de la conception. C'est l'objet du présent ouvrage.

Que signifie former à la conception ? Certains ont prétendu que la conception, la création, est typiquement ce qui ne peut s'apprendre que par l'expérience pratique, par un apprentissage par projet. En fait cette idée reçue n'est pas fondée. Des expériences historiques ont montré qu'il était possible de former à la conception, y-compris pour des conceptions ayant de fortes ambitions créatives. Et ceci avec des effets remarquables. Rappelons deux exemples emblématiques où former à la conception était un des leviers majeurs d'une politique économique et sociale de l'innovation : au XIX^e siècle, la politique allemande de rattrapage industriel s'appuie notamment sur la création de formations à la conception délivrées dans les toutes nouvelles Écoles techniques, contribuant ainsi à l'émergence de cadres scientifiques et techniques pour les bureaux d'études des futures grandes entreprises allemandes (AEG, Siemens, Bosch...) (voir étude de cas historique, chapitre 1 de cet ouvrage). Fin XIX^e début XX^e, en Allemagne, mouvements intellectuels et politique industrielle cherchent les moyens de concevoir des produits qui incarnent une style nouveau pour une société en mutation et qui témoignent que le *made in Germany* peut être un gage de qualité. Ces réflexions débouchent notamment sur la création de nouvelles écoles telles que le Bauhaus, dont les cours font encore aujourd'hui référence dans les formations de design industriel (voir chapitre 4). Ces deux exemples nous montrent donc que former à la conception, c'est s'inscrire dans des traditions prestigieuses que cet ouvrage s'efforcera de prolonger.

Ces exemples nous montrent aussi que la question n'est pas de savoir si l'on peut former à la conception et à l'innovation mais plutôt *comment* on forme à la conception. Soulignons plusieurs leçons à tirer de ces formations :

- Première leçon, l'importance du *raisonnement conceptif* : les plus grands artistes enseignent au Bauhaus (Klee, Kandinsky, etc.) mais ils n'exhibent pas leur pratique, ils enseignent des théories qu'ils ont parfois eux-mêmes élaborées pour former des créatifs ; de même les professeurs des écoles techniques peuvent être de grands praticiens très au fait des questions industrielles, mais cela les pousse précisément à formuler des théories du raisonnement conceptif pour permettre à leurs élèves de dépasser les blocages et les fixations qu'ils repèrent dans l'industrie de leur époque.
- Deuxième leçon : enseigner le raisonnement ne suffit pas, il faut aussi *enseigner les méthodes* qui permettent au concepteur de déployer un raisonnement conceptif souvent très exigeant.
- Troisième leçon : la conception, même celle des créatifs, n'est pas individuelle et il faut enseigner aussi les *organisations de la conception*, permettant la division du travail, la coordination et la coopération.
- Quatrième leçon : l'activité de conception implique des *logiques de performances* et de gestion de ressources spécifiques qui doivent être prises en compte dès la formation des concepteurs.
- Cinquième leçon : une formation à la conception doit aussi rendre les concepteurs sensibles aux *tendances et aux dynamiques des objets, des usages, des collectifs et des sociétés contemporaines*, ie aux champs d'innovation qu'ils pourraient avoir à explorer.

Cinq leçons qui sont autant de facettes d'une formation à la conception : raisonnement, méthodes, organisation, performance, champs d'innovation. Ce sont donc ces cinq facettes que ce cours se propose d'aborder, appliquées aux situations de conception contemporaines.

Sur ces cinq facettes, il existe aujourd'hui des corpus très fournis, issus notamment du management de l'innovation, du management de la technologie, de l'économie et de la sociologie de l'innovation, de l'engineering design ou de l'industrial design. Ces corpus sont en pleine évolution ces dernières années. Ainsi la gestion de la technologie et de l'innovation intègre progressivement des méthodes qui vont au-delà de la gestion de l'innovation incrémentale pour permettre la gestion de l'innovation de rupture ; elle décrit aussi des formes de leadership dans lesquelles le « design thinking » vient compléter les capacités décisionnelles traditionnelles ; elle discute le recours à des ressources externes dans des logiques d'« open innovation ». Pour l'économie de l'innovation, la question n'est plus seulement l'allocation optimale de ressources ; il faut aussi intégrer les logiques de création

de ressources par croissance et apprentissage et des formes nouvelles de relations entre acteurs permettant des dynamiques d'écosystèmes originales. Dans le domaine de l'engineering design, de nouvelles théories et de nouvelles méthodes de conception intègrent les logiques créatives contemporaines et proposent des formalismes à forte générativité.

L'objectif de ce cours est de présenter ces différents corpus et leurs évolutions dans un cadre synthétique et raisonné, qui d'une part permette un dialogue fécond entre les différentes approches et qui d'autre part soit suffisamment ouvert pour permettre aux étudiants d'intégrer voire de développer eux-mêmes de futures méthodes de conception.

Pour ce faire, la formation repose sur un parti pédagogique (et théorique) : fonder l'enseignement sur les théories et modèles formels de la conception. C'est leur maîtrise qui permettra ensuite une meilleure compréhension des autres facettes (méthodes, organisation, économie, champs d'innovation). On peut ainsi représenter la logique d'enseignement par la figure ci-après.

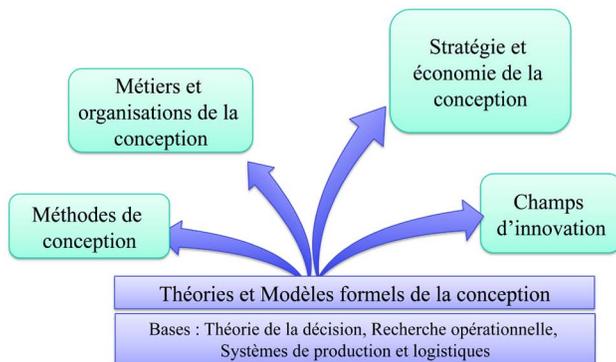


Figure 1: Parti pédagogique : fonder l'enseignement sur les théories et modèles formels de la conception.

Ces fondations théoriques permettent aussi de combiner les approches de management de la technologie et de l'innovation (qui privilégient plutôt les aspects d'organisation et de stratégie), les approches d'ingénierie (qui portent plutôt sur les questions de méthodes et de théorie) et les approches de types industrial design ou les approches plus expérimentales de type «lab» (MIT media Lab, Stanford Design Lab, etc.) qui privilégient une approche par les objets et les champs d'innovation.

Ces fondations théoriques offrent enfin des bases communes à des professionnels de la conception qui se sentent parfois, à tort, très éloignés : R&D, bureau d'étude ou cabinets de conseil fondent ainsi leur expertise (et leur légitimité...) sur leur maîtrise des méthodes et des organisations, les experts d'une direction des programmes ou

les cabinets de conseil en stratégie sur leur maîtrise de la stratégie et de l'économie de l'innovation, les directions du produit ou du design sur leur connaissance des champs d'innovation. Partir des fondements théoriques permet de donner des éléments pour ces trois grands métiers et de favoriser les collaborations entre eux.

L'organisation générale de l'ouvrage repose sur la distinction entre *deux régimes de conception* historiques : *la conception réglée* de la grande entreprise à R&D traditionnelle, et *la conception innovante* qui émerge aujourd'hui sous les formes les plus variées dans l'industrie contemporaine. Les chapitres 1 et 2 portent sur la conception réglée ; les chapitres 3 et 4 sur la conception innovante. Chacun de ces régimes correspond d'abord à des modes de raisonnements très contrastés, qui induisent des méthodes, des organisations, des logiques de performance et des types d'innovation spécifiques.

Pour aborder chaque régime, on part d'abord de l'activité élémentaire, celle d'un projet de conception, un projet de conception réglée (chapitre 1) ou un projet de conception innovante (chapitre 3). Pour ce projet on étudie d'abord le type de raisonnement à conduire puis la nature de la performance à atteindre et les organisations mobilisées par le projet pour atteindre ces objectifs. Dans un second temps on étudie les conditions générales pour qu'un ensemble de projets de ce type puisse se développer. On aborde alors les questions au niveau de l'entreprise et de son écosystème, en régime de conception réglée (chapitre 2) et en régime de conception innovante (chapitre 4). On part cette fois des logiques économiques propres à chacun de ces régimes, puis on étudie les conditions cognitives pour atteindre ces performances (types de connaissances) et enfin les organisations associées.

On représente le synopsis du cours avec le schéma ci-après.

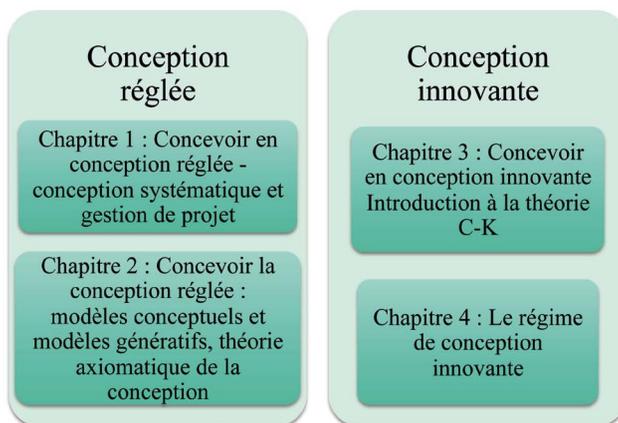


Figure 2: Synopsis de l'ouvrage.

Chaque chapitre est ensuite composé de différents matériaux : un cours principal, des études de cas contemporaines, des études de cas historiques et des ateliers. À chaque fin de chapitre on rappelle les principales notions et on propose des lectures complémentaires.

Avant d'aborder ces quatre chapitres, nous indiquons dans ce chapitre introductif la logique générale d'une approche par les régimes de conception. Nous montrons d'abord que les *a priori* et les approches simplistes de la gestion et de l'économie de l'innovation ne permettent pas d'expliquer des énigmes et des paradoxes au cœur de la conception contemporaine. Nous posons ainsi quelques questions que nous aurons à résoudre au cours de l'ouvrage. Nous mettons ensuite en place les premiers éléments théoriques pour élaborer nos réponses : nous indiquons les raisons d'une approche par la conception et par les régimes de conception et nous précisons un modèle canonique d'un régime de conception. Nous verrons qu'un régime de conception peut être caractérisé par un modèle de raisonnement de conception, un modèle de performance et un modèle d'organisation.

I. QUELQUES ÉNIGMES ET PARADOXES

Commençons par les idées reçues, tant elles sont prégnantes quand on parle de l'innovation aujourd'hui. Pourquoi faire un cours de conception, alors que nous disposons de réponses toutes faites pour obtenir les innovations qui semblent indispensables aux économies contemporaines ? Après tout, ne suffit-il pas 1) de consentir un substantiel effort en R&D ? 2) d'organiser des projets innovants et audacieux, fondés sur des idées originales et portés par des duos expert-manager compétents ? 3) de faire preuve de créativité et de rigueur décisionnelle ?

Ces évidences imprègnent les esprits. Or elles conduisent à de redoutables paradoxes. Réinterroger ces idées reçues va nous permettre de préciser les raisons qui rendent utile aujourd'hui un cours sur la «conception».

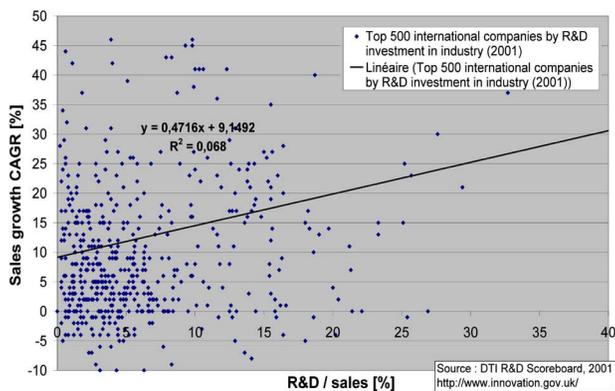
I.A. Paradoxe de la R&D : l'investissement ne fait pas l'innovation – la conception une activité de plus en plus lourde à organiser

Première idée reçue : Pas d'innovation sans un investissement conséquent en R&D. «Investir 3% du PIB en R&D»¹, «augmenter l'effort de R&D», etc. sont des mots d'ordre classique pour des états souhaitant favoriser l'innovation ou pour des

¹ C'est l'objectif que l'Europe s'était fixé au sommet de Lisbonne pour l'horizon 2010 et qu'elle a assigné en 2010 pour 2020 à sa nouvelle politique d'innovation.

analystes financiers cherchant à évaluer la capacité d'innovation d'une entreprise. Ils appellent un double commentaire :

- d'une part les rapprochements entre l'effort de R&D consenti par les plus grandes entreprises mondiales et leur croissance ne montrent aucune corrélation significative (voir études (Jaruselski, Dehoff et Bordia 2005; Jaruselski, Loehr et Holman 2012), voir notre étude sur les chiffres DTI (Le Masson, 2012), (Jones 1995), illustration ci-après), ce qui invite à réviser sérieusement ce mot d'ordre. D'autant que certaines entreprises (comme Apple) connaissent des croissances impressionnantes, construites sur l'innovation, avec un effort de R&D pourtant inférieur à la moyenne de leur secteur;
- mais d'autre part l'effort de R&D, ou plus généralement de conception, est en augmentation très régulière, faisant par exemple de la France un pays dans lequel près de 50 % des ingénieurs mènent une activité de conception (voir données dans Le Masson *et al.* 2010).



	Company	2010 \$US Mil.	Rank	as % of Sales (intensity)
1	Apple	\$1,782	70	2.7%
2	Google	\$3,762	34	12.8%
3	3M	\$1,434	86	5.4%
4	GE	\$3,939	32	2.6%
5	Microsoft	\$8,714	4	14.0%
6	IBM	\$6,026	15	6.0%
7	Samsung	\$7,873	7	5.9%
8	P&G	\$1,950	61	2.5%
9	Toyota	\$8,546	6	3.9%
10	Facebook	Not reported	n/a	Not reported

Figure 3: Le paradoxe de la R&D. En haut: Intensité de R&D (R&D/Chiffre d'affaires) vs croissance annuelle lissée sur 5 ans pour les 500 plus gros investisseurs mondiaux en R&D industrielle (chiffres Department of Trade & Industry (DTI) du Royaume-Uni, 2001) – il n'y a pas de corrélation significative. En bas: les investissements en R&D des 10 compagnies jugées les plus innovantes (chiffres du rapport Booz Allen Hamilton 2011) – ces compagnies ne sont pas les plus gros investisseurs en R&D de leur secteur.

Il importe de préciser dès à présent quelques ordres de grandeur. Parler de conception collective (une équipe de conception), ce n'est plus parler d'un ingénieur entouré de quelques techniciens ou d'un petit commando inventif. En 2002, on compte ainsi près de 20 000 ingénieurs et techniciens au Technocentre (bureau d'études) de Renault à Guyancourt en banlieue parisienne ; en 2004 on compte plus de 800 PhD au centre de recherche d'Astra-Zeneca à Göteborg en Suède. En parlant de conception, on parle aujourd'hui de nouvelles usines à cols blancs.

Notons que ces activités sont souvent assez mal identifiées dans les études statistiques, qui tendent à étudier les activités économiques comme des activités de production – pour lesquelles la conception serait un service. Or ces «services» ont pris aujourd'hui des proportions très importantes dans les économies contemporaines, qui sont ainsi devenues des économies de «conception» et plus seulement de «production». Dans la suite de cet ouvrage nous étudierons ces économies de conception : leur périmètre, leur dynamique, leur efficacité...

I.B. Les paradoxes de l'organisation de la conception innovante

Deuxième idée reçue: innover c'est avoir des idées originales, savoir trouver les ressources pour les développer et savoir faire preuve de ténacité dans un processus d'essai-erreur forcément long, coûteux et risqué – ce serait la «discipline» des organisations de l'innovation (voir (Drucker 1985; Tidd, Bessant et Pavitt 1997)).

Or des entreprises (voir (Le Masson, Weil et Hatchuel 2010a)) présentent des traits organisationnels plus complexes : chez certaines, les idées folles ne sont pas laissées à quelques intrapreneurs créatifs, elles font l'objet d'un *management rigoureux et précis* par les plus hautes instances de l'entreprise ; chez d'autres, il s'agit moins de rassembler les compétences ad'hoc dans des équipes projets que d'assurer le *renouvellement des métiers de l'entreprise* selon un métabolisme complexe (Chapel 1997) ; chez d'autres encore, l'essai-erreur n'est pas un processus aléatoire mais suit en fait *des logiques d'exploration rigoureuses*.

C'est tout un modèle organisationnel qui pose question : celui de l'entonnoir de sélection et de développement d'idées. Le processus d'innovation consisterait à aller de l'idée au produit ? Prétendre encore cela aujourd'hui, c'est oublier 150 ans d'histoire industrielle, ignorer deux révolutions industrielles, l'organisation de la grande entreprise à R&D, et l'essentiel des corpus et compétences des grandes professions conceptrices (ingénieurs, scientifiques, business, design, etc.). Prétendre cela c'est négliger quatre points critiques :

1. *Il faudrait plus d'idées ?* Il semble en fait que ce n'est pas la quantité d'idée qui fasse problème – ce ne sont généralement pas les idées qui manquent, ce

sont les « bonnes » idées... et *les grands nombres ne compensent pas les fixations*: sans contraintes, avec des ressources parfois immenses, des collectifs vont pourtant laisser orphelins de toute exploration de larges champs d'innovation (voir les notions de fixation et d'innovation orpheline plus loin dans cet ouvrage). Les concepts innovants ne sont pas le fruit du hasard, ils sont le résultat de processus rigoureux et exigeants.

2. *Il faudrait plus sélectionner?* Mais est-ce réellement une question de quantité? Rappelons que les processus de sélection les plus exigeants, avec des taux de sélection d'un sur cent (consumer market) voire d'un sur plusieurs millions (high throughput screening pharmaceutique) laissent passer des produits qui seront lancés sur le marché et qui, pour une très large proportion, seront des échecs (2/3 des nouveaux produits en grande consommation sont des échecs)! Plus que le taux de sélection, c'est le processus qui pose question – non pas sélectionner mais piloter et apprendre.
3. *Il faudrait mieux utiliser les compétences disponibles*, disponibles en interne et, surtout, à l'heure de l'open innovation et du big data, disponibles en externe? Mais est-ce réellement une question d'accès et d'usage? Sur les sites des plus grands acteurs de l'open innovation, les challenges intitulés « smart cities », « cancer therapy », « new mobility », « sustainable energy », « energy storage », « autonomie des personnes fragiles »... ne peuvent tout simplement pas être posés! Et si la conception contemporaine avait aussi besoin de formes nouvelles de *création* de connaissances?
4. *Il faudrait plus d'essai-erreur (et plus de moyens pour cela)?* Mais ne risque-t-on pas le syndrome des Shadoks, qui, sachant que leur fusée n'a qu'une chance sur un million de marcher, s'empressent de « bien rater les 999 999 premiers essais »!? « plus ça rate, plus on a de chances de réussir » déclarent fièrement les shadoks. Les Shadoks posent en fait une question de statistique fondamentale pour l'organisation du processus de conception : soit l'organisateur se contente de demander des moyens pour jouer suffisamment souvent et longtemps – mais nos sociétés et nos économies peuvent-elles encore se le permettre? Soit la tâche des organisateurs est précisément d'inventer un processus de conception qui permette que, même lorsqu'il n'y a qu'une chance sur un million de gagner au début, on peut piloter le processus pour que progressivement la probabilité change, augmente et tende vers 1. Autrement dit : *le travail de l'organisateur d'un processus de conception ce n'est pas de jouer dans un espace de probabilités donné; c'est de changer l'espace de probabilité*. Comme on le verra, ce n'est pas de décider dans l'incertain, c'est de structurer l'inconnu.

Depuis maintenant près de deux siècles, aux logiques de laissez-faire, de génération aléatoire et de sélection aveugle, les grandes organisations de la conception ont substitué une grande rigueur dans l'exploration et des logiques de croissance métabolique impliquant toute l'organisation dans un mouvement constant de

renouvellement des compétences et des produits. Ce sont ces logiques, peut-être trop mal connues, que nous allons étudier dans cet ouvrage.

I.C. Les paradoxes du raisonnement de conception innovante

Troisième idée reçue: pour innover, il faut être créatif ou savant : avoir des idées originales et/ou tirer parti des découvertes scientifiques les plus pointues. Mais qu'est-ce exactement que le raisonnement créatif ? Et quel est le rôle de la connaissance dans les raisonnements de conception ?

Le raisonnement créatif semble la clé de l'innovation ; c'est paradoxalement un des points aveugles des représentations. « Innover c'est savoir développer de bonnes idées » : mais qu'est-ce qu'une bonne idée ? Qu'est-ce qu'une idée originale ? Au sens strict (Boden 1990) la notion d'originalité renvoie au fait de briser certaines règles de conception, *ie* briser certains attributs définitionnels de l'objet. L'idée originale oblige à réviser les axiomatiques de l'objet. Un processus dont l'exigence ne doit pas être sous-estimée !

« Innover c'est appliquer les résultats de la recherche fondamentale » : mais que signifie « appliquer » ? Quels sont les résultats à appliquer ? Et ne peut-on supposer, à l'inverse, que ce sont plutôt les « bonnes idées » qui invitent à reprendre des questions de recherche fondamentale ? Les nanomatériaux ou les nano-fluides ne posent-ils pas la question de nouvelles structures cristallines ou de nouveaux états de la matière ?

Au-delà des évidences, le raisonnement créatif pose donc des questions fondamentales concernant la révision des axiomatiques des objets et le rôle de la connaissance dans ces processus.

Il s'agit d'un changement paradigmatique : gérer, n'était-ce pas décider ? Les managers ne sont-ils pas des décideurs ? Or le raisonnement utile pour gérer l'innovation pourrait bien être d'une toute autre nature : non plus décider mais générer (imaginer) les alternatives ; ce ne sont plus les théories de la décision qui peuvent servir de base aux modèles de gestion de l'innovation ; ce sont les théories de la conception. Un cours de conception aujourd'hui est donc une introduction au paradigme post-décisionnel qui caractérise les sociétés contemporaines.

Ces quelques paradoxes posent donc autant d'énigmes : comment étudier et améliorer la performance des capacités d'innovation ? Comment organiser l'innovation ? Comment modéliser le raisonnement de conception innovante ? C'est à ces questions que nous allons chercher à répondre dans la suite de cet ouvrage. Nous allons tout d'abord préciser les définitions de quelques termes

clés (innovation, régime de conception) puis nous donnerons un cadre général (modèle canonique) qui nous permettra de positionner progressivement les différents modèles que nous allons étudier.

II. L'ENJEU DES DÉFINITIONS : CAPACITÉS D'INNOVATION ET RÉGIMES DE CONCEPTION

Précisons d'abord quelques définitions.

II.A. Les pièges du terme « innovation »

Nous ne chercherons pas ici à faire l'histoire du mot « innovation ». La littérature, notamment en science économique, s'accorde généralement sur la définition issue de l'économétrie, selon laquelle « une innovation est une invention transformée en un produit vendu sur un marché » (voir par exemple les travaux de McLaurin, disciple de Schumpeter qui, parmi les tous premiers, développe une économétrie de l'innovation (Maclaurin 1953)).

Dans la perspective gestionnaire, cette définition pose une première difficulté : en considérant l'innovation comme un jugement sur un produit ou un service *existant* (puisqu'on le trouve sur un marché), elle conduit inévitablement à des évaluations *ex post*, là où la gestion de l'innovation exige des capacités d'action *ex ante*.

Une seconde difficulté tient au contraste entre cette définition et l'histoire des innovations : en favorisant une vision singulière de l'innovation, la définition tend à masquer les phénomènes de répétition, de diffusion et d'expansion caractéristiques de l'innovation-système, telle que peut l'illustrer par exemple l'histoire des chemins de fer. Loin des figures de l'exploit singulier, telles qu'elles avaient pu apparaître avec les ingénieurs de la Renaissance (couple de Sainte Marie des Fleurs à Florence par exemple bâtie par Brunelleschi sans échafaudages), l'innovation dans les chemins de fer suppose *un monde d'innovations coordonnées* : nouvelles énergies, nouveaux matériaux, nouvelles infrastructures, nouvelles sciences, nouveaux usages, nouvel urbanisme, nouvelles architectures, nouvelle esthétique, nouveaux modèles d'affaire, nouvelles formes d'action collective (société anonyme).

Enfin cette définition laisse entière l'énigme de l'innovation *aujourd'hui* : si l'on parle tant d'innovation, s'agit-il d'un effet de mode – l'engouement pour l'innovation serait cyclique, superficiel, on parlerait d'innovation parce qu'on a oublié les anciennes recettes ? – ou bien s'agit-il d'une nouvelle révolution industrielle ?

Le parti de ce cours, est d'éviter, au moins dans un premier temps, les débats sur la notion d'innovation et de préférer décrire les logiques de gestion de l'action collective qui peuvent *conduire* à l'innovation. Pour cela la notion de capacité d'innovation, décrite comme une capacité de conception, plus orientée vers l'action collective, apparaît plus pertinente.

II.B. Notion de régime de conception

Bien que moins ambiguë et plus prometteuse pour décrire les processus d'innovation, la notion de conception reste chargée d'interprétations restrictives. L'ancienne définition de l'AFNOR est exemplaire de telles restrictions. Selon la norme X50-127 de janvier 1988, la conception consiste en une activité *créatrice, qui partant des besoins exprimés et des connaissances existantes aboutit à la définition d'un produit satisfaisant ces besoins et industriellement réalisable*. Cette définition, révisée et étendue depuis, illustre bien les restrictions classiques : il existerait des besoins existants, les connaissances nécessaires sont disponibles. À l'inverse, nous allons progressivement préciser une définition de la conception (voir théorie C-K, cours 3) qui intègre la création de connaissance et la génération d'alternatives et de mondes nouveaux.

Remplacer le terme innovation par celui de conception et élargir la définition de la conception n'est pas encore suffisant pour décrire les *logiques d'action collective* de conception susceptibles de conduire à l'innovation. Dans une perspective *gestionnaire*, plusieurs facettes doivent être ajoutées. C'est pourquoi nous introduisons, dans la suite du cours, la notion originale de **régimes de conception**, que nous caractériserons par trois dimensions : un *raisonnement* de conception particulier, une *forme d'organisation collective* et des logiques de *performance* (propres aux firmes ou à l'écosystème). La notion de régime, courante en économie, présente l'avantage d'insister sur la pérennité de l'action collective (un régime de conception est une forme de conception industrielle caractérisée par une certaine stabilité au cours du temps), sur les formes variées (il existe *a priori* plusieurs régimes) et sur les transitions (les régimes se succèdent voire se superposent).

Mais on ne saurait trop souligner les spécificités de cette notion de régime appliquée à la conception. En effet, produits et compétences apparaissent comme les éléments structurant et stables des régimes de production – architecture des produits et répartition des savoirs pouvaient expliquer certains régimes productifs. Or la conception implique un *renouvellement* des mondes d'objets et des univers de compétences – quels sont alors les éléments stables structurant un régime de conception ? Peut-il même y avoir des éléments stables pour un régime d'action caractérisé par la déviance et la subversion ? Ce sera précisément l'intérêt de la notion de régime de conception que de conduire à préciser les éléments structurants à l'origine de dynamiques spécifiques d'évolution des compétences et des produits.

III. MODÈLE CANONIQUE D'UN RÉGIME DE CONCEPTION

Dans la suite du cours on dégagera plusieurs régimes de conception (Le Masson et Weil 2008). Ces régimes s'inscrivent dans un modèle canonique, très général et peu spécifique, un cadre minimal à instancier pour obtenir une description suffisamment spécifique. Avec le modèle canonique il s'agit de préciser quelles seront les dimensions à décrire pour avoir une représentation consistante et complète d'un régime.

Décrire un régime consistera à décrire les raisonnements, les organisations et la logique de performance du régime de conception.

III.A. Modèle canonique du raisonnement X , $K(X)$, $D(X)$, $P(X)$

Première dimension d'un régime de conception : un modèle de raisonnement particulier. Cette notion de modèle de raisonnement peut sembler abstraite. Mais elle est critique pour comprendre la spécificité du raisonnement de conception, par rapport notamment au raisonnement de modélisation scientifique ou au raisonnement décisionnel (voir énigme 3 ci-dessus).

III.A.1 - Approche intuitive

On peut donner quelques exemples de questions requérant une forme de raisonnement de conception :

1. concevoir un nombre pair entre 1 et 3;
2. concevoir l'estimation statistique d'un paramètre inconnu pour une famille de lois connue;
3. concevoir les solutions d'une équation qu'on ne sait pas résoudre analytiquement;
4. concevoir le trajet le plus court dans un pays inconnu;
5. concevoir un frein automobile ayant une course de freinage de 20m à 100km/h;
6. concevoir un éclairage d'habitacle automobile magique.

Noter qu'au-delà du caractère ludique, ces exemples correspondent aussi à des aspects spécifiques de la conception *industrielle*. Pour les cas 5 et 6, le concepteur est « visible ». Indiquons quelques analogies pour les cas 1 à 4 : un concepteur pourra avoir à choisir dans un catalogue de composants proposés par un fournisseur celui qui correspond à ses critères (cas 1), il devra choisir

un certain procédé en tenant compte de la dispersion des performances des échantillons (cas 2), il devra trouver un dimensionnement optimal dans des systèmes d'équations complexes (cas 3), il devra découvrir des alternatives plus performantes à certaines étapes de conception (identifier un fournisseur moins cher pour un composant clé) (cas 4).

Ces exemples illustrent en fait, à travers un quadruple continuum, les dimensions de ce qui peut être à concevoir. On passe ainsi :

1. d'une logique de *sélection* d'un objet au sein d'une *liste d'objets connus* X_1 à une logique de *conception d'un nouvel objet* X_x ;
2. d'une logique où l'ensemble des connaissances est disponible à une logique où il faudra *produire de la connaissance nouvelle* (pays inconnu, etc.) ;
3. d'une logique où les paramètres permettant de concevoir l'objet sont connus (un nombre, un trajet comme ensemble de points géographiques ordonnés, etc.) à une logique où les *paramètres de conception sont inconnus* (les technologies du frein demandées ne sont pas nécessairement celles d'aujourd'hui : aucune technologie connue ne permet d'avoir la course de freinage demandée) ;
4. enfin d'une logique où les propriétés attendues de l'objet, les paramètres de performance, sont connues (parité, qualité de l'estimateur, « le plus court », course de freinage) à une logique où les propriétés attendues de l'objet sont à enrichir ou à préciser (la « magie » de l'éclairage).

Les questions de conception sont donc plus ou moins ambitieuses en fonction des explorations attendues sur quatre dimensions :

1. la définition de l'objet X ;
2. les connaissances associées à l'objet (son environnement, son usage, ses « lois », etc.) $K(X)$;
3. les décisions qu'il est possible de prendre pour faire exister l'objet $D(X)$ (les technologies, les choix de conception, etc.), et les propriétés attendues de cet objet à concevoir $P(X)$;
4. le tableau ci-après explicite X , K , D , P pour chacun des exemples précédents.

Tableau 1: Approche intuitive des différentes formes de raisonnement de conception.

Concevoir		X	K	D	P
Un nombre pair entre 1 et 3	Ensemble des objets est connu (nombre pair est de la forme $2.n$ ou n entier); choix connu: parcourir tous les nombres entiers entre 1 et 3 et tester	Nombre entier	Péano (successeurs de 1); test de parité, tests «<» et «>».	Algorithme: 1, 2, etc. et tester division entière par 2	Parité
Estimation statistique (de m pour une $LG(m, \sigma)$ (eg concevoir le prix moyen du m^2 connaissant n transactions)	Pour les lois simples, P et D sont dans K	Une statistique, ie une fonction des X_i ;	théorie de l'estimation (ESBVM: estimation sous biais de variance minimale, EMV: estimation du maximum de vraisemblance); Une réalisation de l'échantillon;	Suivre une des recettes connues (ESB puis statistique exhaustive; ou estimateur du max de vraisemblance, etc.); calculer la valeur pour la réalisation de l'échantillon	Variance minimale, sans biais, calculable, etc.
Les solutions d'une équation qu'on ne sait pas résoudre analytiquement	D et P dans K (si on a prouvé qu'il existe une solution dans un ensemble connu, par exemple les réels; sinon c'est plus compliqué!)	Un réel	Vérifier qu'un réel résout l'équation; les algorithmes pour identifier des réels, etc.	Des algorithmes d'approximations successives, etc.	Vérifie l'équation
Le trajet le plus court dans un pays inconnu	L'ensemble des routes n'est pas connu. Donc D n'est pas dans K; P est dans K	Un chemin composé de tronçons, certains connus d'autres pas encore	Certains tronçons; calcul de longueur	Emprunter des voies; mais les voies connues ne suffisent pas (possibilité de découvrir de nouvelles voies mais sans savoir le résultat <i>a priori</i>)	Longueur du chemin aussi courte que possible (on sait évaluer P)
Un système de freinage	L'ensemble des systèmes de freinage ayant cette course n'est pas connu. D n'est pas dans K; P est dans K	Un système de freinage (nature de certains composants inconnue)	Système de freinage connus (mais pas suffisants); capacité à évaluer la course à 100km/h	Utiliser les composants (ou plus généralement: les langages) des systèmes de freinage passés. Mais cela ne suffit pas pour la course demandée; D pour P est donc partiellement inconnu	Course de 20m à 100km/h: connu, évaluable (on sait évaluer P)
Un éclairage automobile magique	Ni D ni P ne sont dans K	Un système d'éclairage (nature des composants et nature de la performance partiellement inconnues)	Les systèmes d'éclairage passés (et leurs langages associés – mais la «magie» n'en fait pas partie...)	Utiliser les composants (ou les langages) des éclairages passés; mais cela ne suffit pas à faire un éclairage magique. D pour P est partiellement inconnu.	«magie»: certains sens connus, d'autres encore inconnus (P partiellement inconnu)

III.A.2 - Approche par les théories de la décision

Le modèle canonique $X, K(X), D(X), P(X)$ (Hatchuel 2003) est en fait une généralisation des théories de la décision (voir Savage, Raïffa, Wald (Wald 1950; Raïffa 1968; Savage 1972)). Les théories de la décision les plus générales modélisent le raisonnement de décision de la façon suivante : étant donné un ensemble d'objets X , avec des connaissances sur ces objets $K(X)$ (variable aléatoire modélisant certains paramètres indécidables sur cet objet – densité de probabilité pour la taille du marché pour un produit par exemple), des décisions possibles sur cet objet $D(X)$ (choix d'une technologie pour le produit) et une performance associée à la décision (minimiser l'espérance d'une fonction de coût), les théories de la décision permettent de définir la meilleure fonction de décision minimisant l'espérance de coût.

Ce résultat est très puissant : il intègre par exemple les notions d'incertitude (variable aléatoire sur les états), les notions de croyance (probabilité subjective sur les états), des formes d'apprentissage par échantillonnage sur l'espace des états (théorie bayésienne de la décision dans l'incertain), etc. Il repose toutefois sur quelques conditions restrictives concernant la structure de $X, K(X), P(X), D(X)$, conditions critiques pour les questions de conception : en fait les décisions $D(X)$ possibles sur l'objet X sont connues au départ ($D(X) \subset K(X)$) et il n'existe de solution que si $P(X)$ est possible dans $K(X)$ (il existe X_0 dans $K(X)$ tel que $P(X_0)$ est vrai). Autrement dit : *la théorie de la décision nous permet de choisir la meilleure alternative parmi des alternatives connues mais elle ne permet pas de générer des alternatives nouvelles.*

Par rapport au cadre décisionnel classique, la conception part de $X, K(X), D(X), P(X)$ donnés mais s'intéresse aux cas où les propositions $P(X)$ ne sont pas vraies dans $K(X)$, *ie* $K(X)$ n'implique pas $P(X)$; ce qui signifie qu'il n'existe pas de décisions $D(X)$ incluses dans $K(X)$ permettant de réaliser $P(X)$. On s'intéresse alors à un nouvel X_x , inconnu, dont on ne peut qu'énoncer progressivement certaines propriétés, et notamment $P(X_x)$ doit être vrai.

Précisons (voir atelier «modélisation-optimisation-conception») : non seulement X_x vérifiant $P(X_x)$ est inconnu mais, à la différence de certaines formes de modélisation, il est aussi considéré comme *inobservable* : la modélisation scientifique peut être confrontée à des cas d'objet inconnu (les rayons X , Pluton planète X , etc.) mais elle postule ces objets comme observables, autrement dit elle considère que ces objets seront caractérisables par des grandeurs connues (masse, position, énergie, longueur d'onde, etc.); en conception l'objet X_x est non seulement inconnu mais inobservable, ce qui signifie que *les dimensions pour le caractériser peuvent être le résultat de l'exploration et qu'elles peuvent prendre des formes inattendues.*

Le modèle canonique nous permet de proposer une définition plus précise de la conception :

Définition de la conception : la conception de X_x est l'ensemble des décisions D à prendre et des apprentissages à faire (δK) pour que X_x soit connu dans le nouveau $K(X)$ étendu, $K'(X)$. Initialement on a $D(X_x) \not\subset K(X)$ (on ne connaît pas les décisions à prendre); après la conception, on se ramène à la situation $D(X_x) \subset K'(X)$.

III.A.3 - Modèle canonique et régimes

Nous étudierons par la suite des modèles du raisonnement de conception qui se caractériseront par la nature particulière des expansions conjointes de D et de K . *A priori*, dans le modèle ci-dessus, le raisonnement de conception peut nécessiter une infinité d'apprentissages et de décisions et rien ne garantit la convergence du processus vers un X_x nouveau. On verra que les régimes de conception reposent sur des théories qui garantissent une certaine robustesse du raisonnement. En particulier on montrera que **les théories de la conception réglée** permettent de conserver le plus possible la base de connaissances initiales $K(X)$ dans $K'(X)$ et à minimiser les expansions, au prix de contraintes sur les $P(X_x)$ acceptables; à l'inverse **les théories de la conception innovante** consistent à redéfinir certaines propriétés de l'objet dans $K(X)$, *ie* à réviser parfois profondément $K(X)$ et permettent alors d'aborder de nouveaux $P(X_x)$.

III.B. Modèle canonique de la performance

Le modèle ci-dessus invite donc à préciser également un modèle général de la performance d'un régime de conception. Nous proposons, en nous inspirant de modèles de rendements de facteurs assez classiques, de construire un modèle canonique de performance en considérant les inputs et les outputs du processus de conception.

En input on mettra les ressources de conception associées à un régime particulier. Par exemple les effectifs ou les efforts de R&D. Plus généralement on s'intéressera aux types de connaissances et aux capacités de production de connaissances.

En output on mettra les expansions opérées (les nouveaux X_x et les nouveaux $P(X_x)$ associés). On s'interrogera sur la nature et la variété de ce qui est conçu (innovation incrémentale ou radicale, continue ou disruptive, etc.).

Une des originalités des régimes de conception, comparés par exemple aux régimes de production, tient à la nature des inputs et des outputs. Alors qu'un régime de production tend à compter des quantités d'un bien connu et de facteurs de production connus (respectivement en *output* et *input*) un régime de conception se caractérisera par la nature particulière des ressources et des expansions qu'il prend en compte. C'est même précisément un des enjeux, pour un régime particulier, de définir de quelles natures seront ces input et ces outputs. La *puissance expansive* (rapport expansion/ressource) des régimes de conception dépendra précisément de ces choix.

La performance d'un régime pourra être étudiée comme les expansions possibles à partir d'un ensemble de ressources données. On trouvera alors des formes d'efficacité variées.

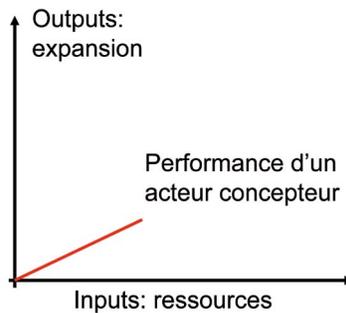


Figure 4: Schéma du modèle canonique de la performance d'un régime de conception.

III.C. Modèle canonique de l'organisation

Le modèle canonique de l'organisation de la conception comporte deux aspects : les formes de coordination entre les capacités de conception mais aussi les formes de *cohésion* (Segrestin 2006).

Décrire les formes de coordination consiste à s'intéresser à la division du travail, aux responsabilités, aux formes de prescription, aux tâches et à leurs interdépendances, à la gestion des ressources, etc.

Décrire la cohésion consiste à étudier les raisons pour lesquelles un collectif est un collectif : on étudie les éventuels « common purpose » (Barnard 1938), les intérêts partagés, les formes de solidarité. On verra que dans les régimes de conception réglée, la question de la cohésion est censée ne pas se poser (on conçoit les X_x qui correspondent à des $P(X_x)$ associés au common purpose, à la raison sociale de

l'entreprise) alors qu'en conception innovante, les explorations peuvent conduire à explorer des $P(X_x)$ qui sont susceptibles de rediscuter le common purpose, soit parce qu'ils sont en contradiction avec certaines orientations stratégiques de l'entreprise, soit parce qu'ils invitent à définir de nouvelles orientations.

CONCLUSION

En conclusion nous pouvons dire qu'un régime de conception sera décrit quand nous saurons préciser chacune des trois dimensions : raisonnement de conception, performance et organisation. Pour chacune d'elles nous sommes maintenant dotés d'un modèle canonique, cadre formel qui nous permettra d'opérationnaliser cette description.

Sur la base de ces modèles nous distinguerons deux familles de régimes : les régimes de conception réglée, dans lesquels un corpus de règles stable structure raisonnement, organisation et performance ; et les régimes de conception innovante, caractérisés par la capacité à provoquer régulièrement des ruptures dans les systèmes de règles de conception. Les premiers sont à l'origine de la grande entreprise à R&D contemporaine et, plus généralement, à l'origine de l'organisation des filières industrielles ; les seconds sont aujourd'hui en émergence rapide, ils viennent compléter la conception réglée et sont à la base des transformations des firmes contemporaines et de leurs écosystèmes.

PRINCIPALES NOTIONS DU CHAPITRE

- Les paradoxes : paradoxe de la R&D, paradoxe des « bonnes idées », paradoxe du raisonnement créatif rigoureux.
- Notion de régime de conception.
- Modèle canonique du raisonnement : $X, K(X, P(X), D(X)$; caractère inconnu et supposé inobservable du X_x à concevoir.
- Modèle canonique de la performance : ressource de conception et output de conception.
- Modèle canonique de l'organisation de la conception : coordination et cohésion.

LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Les notions vues dans ce chapitre sont, pour la plupart, issues des travaux des auteurs. On recommande les lectures suivantes pour approfondissement :

- Sur décision et conception : théorie de la décision (Wald 1950 ; Raïffa 1968 ; Savage 1972) ; conception et résolution de problème (Simon 1969 ; Simon 1979 ; Hatchuel 2002 ; Dorst 2006) ; décision – modélisation – conception (Hatchuel *et al.* 2013)
- Sur la notion de régime de conception : (Hatchuel et Weil 2008 ; Le Masson et Weil 2008) ; voir aussi la notion de régime d'innovation (Godoe 2000) ; les notions de Product Life Cycle, *Dominant Design*, Path Dependancy, Path Creation, etc., seront discutées dans les chapitres suivants.
- Sur les paradoxes de l'innovation : voir chapitres 1 à 3 *in* (Le Masson, Weil et Hatchuel 2006 ; Le Masson, Weil et Hatchuel 2010b).
- Sur cohésion et coordination voir (Barnard 1938 ; Hatchuel 1996 ; Segrestin 2005 ; Segrestin 2006).

Chapitre introductif - Atelier

Modélisation, optimisation et conception, les raisonnements de la production scientifique contemporaine

Un des enjeux des théories et des méthodes de la conception contemporaine est de penser le rapport entre recherche et innovation. On sait qu'entre ces termes, la confusion est grande, oscillant entre l'assimilation (la recherche fait automatiquement l'innovation) et l'asservissement (la recherche ne fait l'innovation que si elle est pilotée par l'aval). Cette confusion tient en fait à l'ignorance des raisonnements de conception, qui structurent un lien complexe et parfois riche entre recherche et innovation.

Dans cet ouvrage nous reviendrons régulièrement sur cette question en suivant plusieurs approches (en fonction des régimes, par des études historiques, etc.). Mais dès à présent, cet atelier permet de mieux caractériser les *raisonnements* de recherche classique et de dégager leurs liens avec des raisonnements de conception. Ce travail éclaire aussi certaines spécificités du raisonnement de conception (pour des éléments plus détaillés, voir (Hatchuel *et al.* 2013)). Il permet enfin d'envisager une forme de recherche dite conceptive, différente de l'optimisation et de la modélisation mais tout aussi rigoureuse.

MODÉLISATION

Historiquement, un premier modèle de production scientifique s'est imposé au cours du XIX^e siècle : la modélisation. Le raisonnement de modélisation considère des objets X qui participent à un phénomène ; on étudie par exemple un conducteur électrique caractérisé par la tension à ses bornes et l'intensité qui le traverse. Ces objets sont définis, ils existent et sont observables (parfois par des observables qui sont corrélés à l'objet) ; on cherche à établir leurs propriétés et on s'intéresse aux relations entre ces objets, *ie* à un modèle $K(X)$. Un tel modèle répond à des caractéristiques spécifiques qui peuvent être d'ordre qualitatif (simplicité, tractabilité, etc.) ou quantitatif (minimiser l'espérance du carré des écarts entre une valeur estimée par le modèle et la valeur de la variable), mais qui ne dépendent pas des objets. À noter que les X peuvent être des attributs d'un système plus complexe.

La discipline reine pour contrôler les modèles est la statistique : la théorie de l'estimation statistique permet d'identifier les valeurs des paramètres d'un modèle paramétrique ; la théorie des tests statistiques permet de garder ou de rejeter un modèle en fonction de l'écart entre les valeurs prédites et les valeurs réalisées ; la théorie de la régression statistique permet de construire des modèles de relations entre variables aléatoires.

On notera que lorsque le modèle présente des anomalies, *ie* lorsque le test du modèle n'est pas satisfaisant, les chercheurs seront conduits à proposer éventuellement de nouveaux objets X_x , eux aussi connus et observables, tels que $K(X, X_x)$ est meilleur que $K(X)$.

Exercice 1 : retrouver dans des cas de modélisation célèbres les X et les $K(X)$: loi d'Ohm ($U = RI$), loi des gaz parfaits ($PV = nRT$), poutre de Saint Venant, etc. ; autres cas en ingénierie : dans l'automobile, modélisation du transfert de bruit du moteur à la caisse, modélisation des réponses vibratoires de pièces stimulées (voir étude de cas sur l'acoustique automobile, chapitre 2).

Exercice 2 : retrouver dans des cas de modélisation célèbres des X_x : les rayons X , la découverte de Neptune et de Pluton (dite planète X), Anderson et la diffusion thermionique (voir (Reich 1985)), etc. Rq : une étude de certains de ces cas est présentée dans (Hatchuel et al. 2013).

OPTIMISATION

Au cours du XX^e siècle, la science s'enrichit d'une seconde approche, l'optimisation. Le raisonnement d'optimisation consiste d'abord à distinguer pour les objets X certains paramètres libres qui pourront être « décidés » par l'optimisateur alors que d'autres paramètres sont invariants. L'optimisation consiste alors à « choisir » les valeurs des paramètres d_i permettant d'identifier un ou plusieurs X_0 vérifiant une certaine propriété $P(X_0)$. La littérature en théorie de la décision et de l'optimisation a traité plusieurs facettes du problème (incertitude, décision multicritères, programmation, problèmes non polynomiaux, etc.). D'un point de vue formel, tous ces algorithmes partent d'un espace de décision défini par X , les connaissances sur les objets $K(X)$, $D(X)$, l'espace des décisions possibles sur les paramètres libres des objets et $P(X)$, l'ensemble des critères utilisés pour sélectionner les décisions d_i de D qui vérifient P .

On notera que l'objet (ou les objets) X_0 résultant d'un tel processus est « choisi » dans un ensemble de X tous observables.

Exercice 3 : donner quelques exemples de cas classiques d'optimisation. Exemple en ingénierie automobile : optimisation du diamètre apparent d'un montant de baie dans une voiture

CONCEPTION

Nous avons pu indiquer dans le chapitre introductif les spécificités de la conception. Par rapport aux raisonnements de conception, nous pouvons indiquer deux traits particuliers :

1. la conception commence avec un objet X_x qui n'est pas observable (il est « inconnu ») mais dont on connaît (souhaite) seulement une propriété $P(X_x)$ telle que les X_i et les connaissances sur les X_i , $K(X_i)$ ne permettent pas de déduire X_x mais ne permettent pas non plus de déduire que X_x n'existe pas ;
2. la conception peut recourir à la modélisation en créant de nouveaux objets X_j en cours de processus ; elle recourra aussi à la décision mais les paramètres libres ne sont pas connus au début du processus ($D(X_x) \not\subset K(X)$).

Exercice 4 : en étudiant l'histoire de la conception du laser (ou celle du nylon, voir chapitre 2, étude de cas historique 1), retrouver les différents éléments ci-dessus (modélisation, optimisation et conception).

Les pratiques d'ingénierie ou de recherche peuvent parfois mêler les deux activités et les exercices ci-dessus permettent de les distinguer. Ainsi un chercheur en difficulté pourra être en fait en situation de conception alors qu'il se pensait en modélisation ; à l'inverse en ingénierie un ingénieur peut se retrouver à concevoir alors qu'il pensait être en situation d'optimisation (à nouveau : voir le cas de l'acoustique Renault, étude de cas du chapitre 2 de cet ouvrage).

Exercice 5 : Le lecteur pourra prolonger la réflexion en étudiant les logiques de simulation : la simulation partage certains traits avec la modélisation et l'optimisation mais comporte aussi des dimensions de conception puisqu'elle permet de générer des modèles originaux à partir de règles et de lois données (voir notamment (Varenne 2007)).

CHAPITRE 1

CONCEVOIR EN CONCEPTION RÉGLÉE – CONCEPTION SYSTÉMATIQUE ET GESTION DE PROJET

La première classe de régime de conception que nous analyserons dans cet ouvrage est celle des régimes de conception réglée. Ces régimes de conception s'appuient sur un ensemble de *règles* pour concevoir efficacement des produits (services) nouveaux, d'où le nom que nous leur avons donné (Le Masson et Weil 2008). Historiquement ils se sont constitués progressivement et ont abouti à la conception systématique, un des régimes de conception réglée, sans doute le plus courant, peut-être le plus performant : c'est le modèle d'organisation (souvent implicite tant il semble naturel) adopté dans les grandes entreprises à R&D ; c'est ce modèle qui permet de structurer les logiques de gestion de projet en développement de produit (NPD : New Product Development).

Dans ce premier chapitre, nous étudions les logiques de conception « en conception réglée », *ie* lorsque sont disponibles des ressources de conception (*ie* des systèmes de règles) bien formées. Nous répondrons ainsi à la question : comment les concepteurs conçoivent-ils un nouvel objet dans le cadre d'un régime de conception réglée ? Nous nous interrogerons dans le chapitre suivant sur la *conception du système de règles lui-même*. Nous verrons alors comment *concevoir* un régime de conception réglée et nous découvrirons à cette occasion quelques propriétés fondamentales de ces régimes de conception. En complément, l'étude de cas historique décrira la constitution progressive de la conception réglée dans les entreprises ; la perspective historique montrera également comment les théories de la conception réglée ont été progressivement élaborées.

Suivant le cadre d'analyse des régimes de conception proposé au chapitre introductif, nous étudierons successivement les raisonnements, la performance et les organisations en insistant sur les outils associés.

I. LE RAISONNEMENT DE CONCEPTION SYSTÉMATIQUE

La conception systématique s'inscrit dans une tradition allemande des théories et méthodes de la conception qui remonte au début du XIX^e siècle (König 1999 ; Heymann 2005 ; Le Masson et Weil 2010 ; Le Masson et Weil 2012). L'ouvrage de référence international est le manuel écrit par Gerard Pahl et Wolfgang Beitz (Pahl et Beitz 1977 ; Wallace et Blessing 2000 ; Pahl et Beitz 2006), «engineering design, a systematic approach», publié en allemand pour la première fois en 1977, traduit par Ken Wallace en anglais en 1984 et réédité plusieurs fois depuis. Cet ouvrage et ses épigones sont très largement diffusés, de sorte que la théorie de la conception systématique (et ses variantes) constitue aujourd'hui une référence très largement enseignée dans les formations en engineering design dans le monde entier.

I.A. Attendus de la théorie de la conception systématique

Pour Pahl et Beitz, une bonne méthode de conception doit répondre à plusieurs exigences :

- elle doit être applicable aux problèmes les plus variés, quel que soit le champ de spécialité – elle doit donc être indépendante des objets à concevoir – ; mais elle doit être compatible avec les notions et les méthodes des disciplines (notamment sciences de l'ingénieur).
- Elle ne repose pas sur la découverte de solutions par hasard, elle contribue à l'inventivité et la compréhension d'ensemble et facilite la recherche de solutions « optimales » ; mais elle doit aussi faciliter l'application de solutions connues quand cela est possible.
- Elle doit être facile à apprendre et à enseigner ; et, « tenant compte des avancées de la psychologie cognitive et de l'ergonomie » (Pahl et Beitz 1977), elle doit permettre de réduire la charge de travail (y-compris la charge mentale), d'économiser le temps, d'éviter l'erreur humaine et de maintenir l'intérêt des concepteurs. Elle doit aussi être compatible avec les instruments disponibles (notamment le traitement informatique des données).

La conception systématique qu'ils proposent correspond à ces critères, comme nous allons le voir.

I.B. Principes fondamentaux

Selon Pahl et Beitz, la conception suit un processus linéaire et décomposable en phases.

Le raisonnement en conception systématique comporte quatre phases principales (voir figure ci-après) et chacune mobilise un langage spécifique de l'objet, à l'exclusion de tout autre langage :

- **Le design fonctionnel**, consiste à clarifier la tâche de conception et à préciser les spécifications fonctionnelles du futur produit. Seul *ce langage des fonctions* est mobilisé pour décrire l'objet. Au cours de cette phase plusieurs spécifications fonctionnelles peuvent être élaborées, plusieurs cahiers des charges possibles sont discutés et au terme de la phase, un seul cahier des charges est conservé.
- **Le design conceptuel**, consiste, à partir du cahier des charges de la phase précédente, à formaliser la structure fonctionnelle (interdépendances, fonctions et sous-fonctions, modularisations éventuelles) et à mobiliser des modèles conceptuels, *ie* des principes techniques, des technologies, pour remplir les fonctions. Seul *le langage des principes techniques* (lois des sciences de l'ingénieur) est mobilisé pour concevoir l'objet – il n'est plus question de discuter de fonctions, il n'est pas encore question de discuter de composants. Plusieurs alternatives conceptuelles doivent être élaborées et l'une d'entre elles est sélectionnée à l'issue de la phase.
- **L'embodiment, ou conception physico-morphologique**, consiste, à partir du schéma technologique obtenu en phase précédente, à procéder à la « mise en organisme » des différents organes. Seul *le langage des composants et de leur intégration en un tout cohérent* est mobilisé, on ne discute plus d'alternatives technologiques, on ne s'interroge pas encore sur les dimensions exactes des composants. C'est une phase de conception architecturale au cours de laquelle on parle en composants, en modules, en pièces, en procédés d'assemblage, etc. À nouveau, plusieurs embodiments sont élaborés au cours de cette phase et l'un d'entre eux est sélectionné.
- **La conception détaillée** qui consiste, à partir de l'embodiment précédent, à dimensionner tous les paramètres libres (dimensionnement des pièces, paramétrages des procédés, identification des matériaux, des fournisseurs, etc.). C'est le langage du dimensionnement et des références produits.

Il est possible de concevoir dans l'une des phases à partir des *inputs* des phases précédentes et indépendamment des phases suivantes.

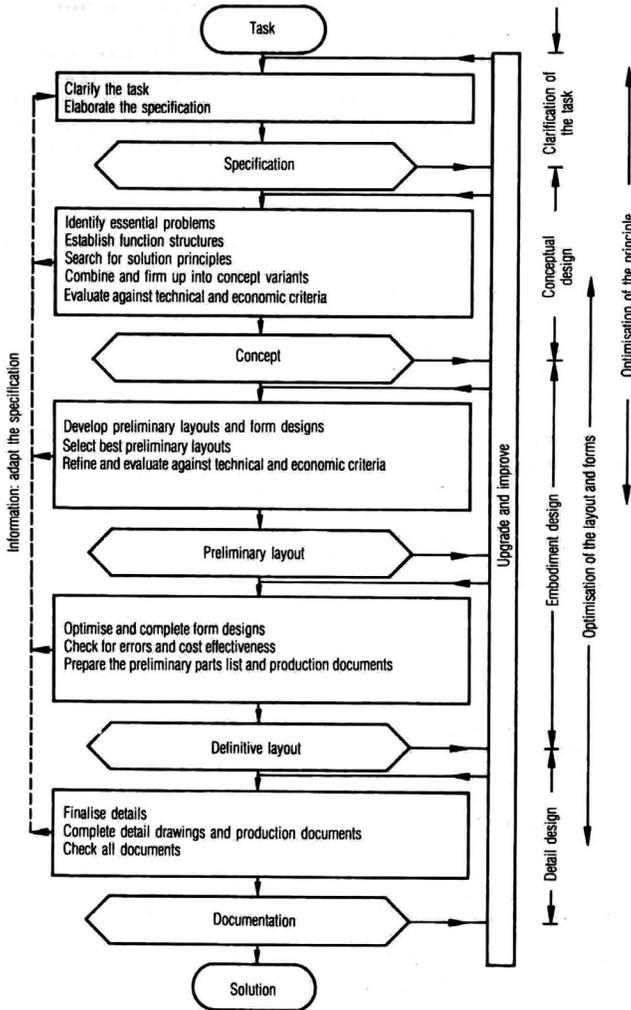


Figure 5: Les quatre langages principaux de la conception systématique au sens de Pahl et Beitz. (Source Pahl & Beitz).

D'un point de vue formel, la théorie systématique permet de prendre en compte des $P(X)$ (spécifications fonctionnelles), elle vérifie qu'ils ne sont pas atteignables avec les solutions connues lors de la sélection du cahier des charges ($K(X)$ n'implique pas $P(X)$, sinon la conception devient une forme d'optimisation); le processus constitue ensuite une série de « décisions » d_i de D permettant de définir progressivement une famille d'objet vérifiant les $P(X_i)$ initiaux. La liste des d_i n'est pas complètement connue au début mais le processus facilite leur élaboration, d'une part en structurant *a priori* des types de d_i (fonctionnel, conceptuel, embodiment, détaillé); d'autre part en permettant à chaque étape de réutiliser des d_i connus antérieurement à chacun des niveaux de langages.

La structuration du raisonnement en langages différents sur l'objet peut s'interpréter comme une division de $\{X, K(X), P(X), D(X)\}$ en quatre sous-espaces $\{X_{\text{fonc}}, K(X_{\text{fonc}}), D(X_{\text{fonc}}), P(X_{\text{fonc}})\}$, $\{X_{\text{conc}}, K(X_{\text{conc}}), D(X_{\text{conc}}), P(X_{\text{conc}})\}$, $\{X_{\text{emb}}, K(X_{\text{emb}}), D(X_{\text{emb}}), P(X_{\text{emb}})\}$ et $\{X_{\text{det}}, K(X_{\text{det}}), D(X_{\text{det}}), P(X_{\text{det}})\}$; dans chacun de ces sous-espaces la connaissance disponible peut ou non permettre d'atteindre le concept proposé; si elle le peut, on se ramène à une situation de décision-optimisation et lorsqu'elle ne le peut pas, les décisions à prendre sur l'objet seront le résultat d'apprentissage associés au niveau de langage mobilisé et limités à ce niveau de langage uniquement. Autrement dit la segmentation en types de langages permet de guider la recherche des nouveaux d_i : même si on a, à chaque niveau, $D(X_{\text{niveau}}) \not\subset K(X_{\text{niveau}})$, les expansions nécessaires pour avoir $K'(X_{\text{niveau}})$ tel que $D(X_{\text{niveau}}) \subset K'(X_{\text{niveau}})$ sont confinées à ce niveau, limitant ainsi la «distance» entre $K(X_{\text{niveau}})$ et $K'(X_{\text{niveau}})$.

Plusieurs éléments essentiels sont introduits par la conception systématique. Sans rentrer ici dans le détail, annonçons tout de suite que :

1. la conception systématique combine des logiques de convergence et de divergence;
2. elle tend, paradoxalement à «ralentir» le processus de conception en évitant de reprendre des solutions préexistantes complètes mais c'est en fait pour préserver des formes de «créativité technique» et éviter les «fixations»;
3. la conception systématique repose notamment sur l'étape clé de la phase conceptuelle où des langages techniques abstraits peuvent être mobilisés pour concevoir l'objet – c'est un «coin conceptuel» (coin : au sens de l'instrument de bucheron!) qui sert à écarter fonctions et composants, à assurer ainsi une relation plus riche et plus complexe entre ces deux termes.

I.C. Exemples illustratifs des langages

Donnons un exemple des différents langages de l'objet sur le cas du réfrigérateur (le lecteur pourra s'entraîner en s'efforçant de faire l'exercice par lui-même, avant de lire ce qui suit) (voir illustrations ci-après)

- Langage fonctionnel: c'est le langage des conditions de valeur (critères de vente) et d'existence (normes commerciales) de l'objet. Ainsi on trouvera: «volume (en litre) à température (à quelques degrés ou dixièmes de degrés près)», normes (normes de sécurité, de consommation énergétique, sur les fluides, sur la recyclabilité...), fiabilité et robustesse (sur des scénarios d'usage spécifique: ouverture/fermeture de porte; étanchéité en atmosphère humide normalisée, etc.), rangements, facilité d'entretien, bruit, dégivrage automatique, indicateur de température, etc.



Figure 6: Quelques éléments pour décrire un réfrigérateur dans le langage fonctionnel.

- langage d'embodiment: c'est le langage des composants; il suppose souvent d'analyser l'objet lui-même (démontage). Pour le réfrigérateur on trouve «l'armoire» (coffre, porte, etc.) puis, en le retournant, une grille (techniquement appelée un «condenseur»), une boule noire qui, lorsqu'on la découpe, s'avère être un compresseur, des tuyaux (dont le capillaire de détente), de la mousse isolante dans les parois du coffre, et un ensemble de tuyaux dans la mousse isolante (techniquement appelé un «évaporateur»). Une analyse plus fine montre que les tuyaux relient entre eux compresseur, condenseur, capillaire de détente et évaporateur.



Figure 7: Quelques éléments pour décrire le réfrigérateur dans le langage d'embodiment.

- Le langage conceptuel est peut-être le moins évident pour qui n'est pas spécialiste de réfrigérateur mais il est indispensable pour comprendre la conception de l'objet. En effet dans ce cas il n'y a pas de correspondance directe fonction – composant (on ne peut affecter un composant à une fonction ou une fonction à un composant), c'est le langage conceptuel qui explique la relation complexe entre fonctions et composants. Le modèle conceptuel principal du réfrigérateur est en effet un cycle thermodynamique diphasique, permettant de «faire du froid» (langage des fonctions) à partir du changement

de phase d'un liquide en un gaz, ce changement de phase étant organisé en un cycle complet commençant par l'évaporation (phase de «production de froid»), passant par une compression, une condensation et une détente avant d'en revenir à l'évaporation. Un tel modèle peut par exemple être représenté dans un diagramme (T, S) (température, entropie) avec une plus ou moins grande précision du modèle, chaque phase du cycle correspondant ensuite à un organe (langage d'embodiment) (voir figure ci-dessous).

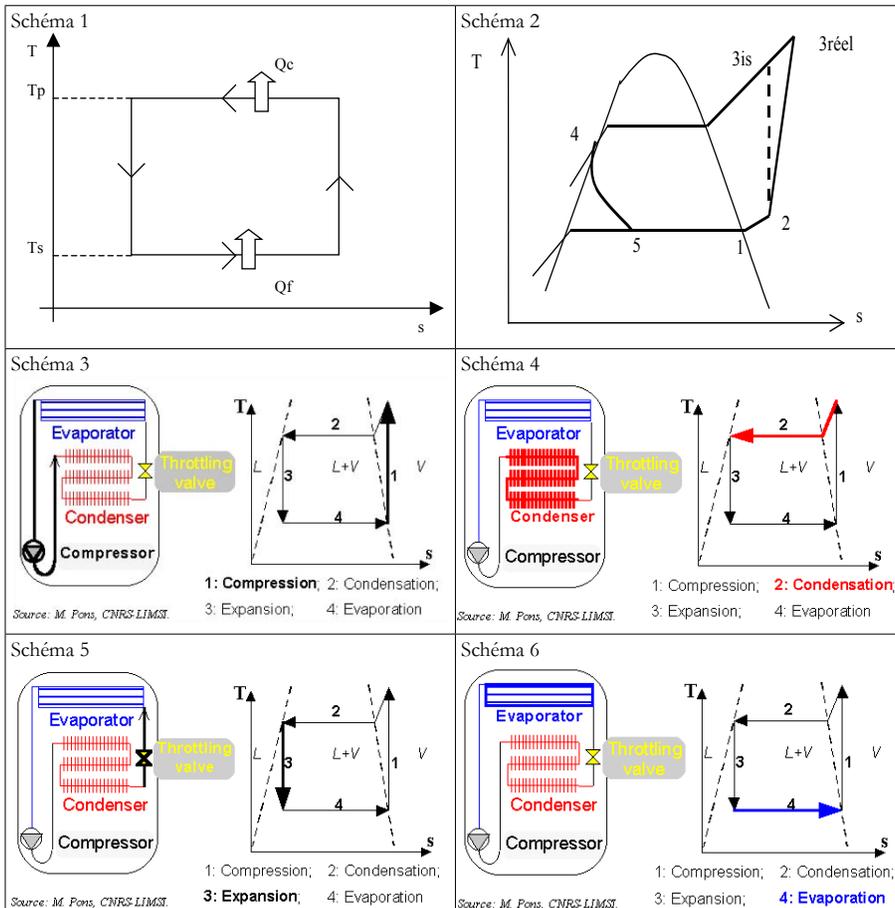


Figure 8: Quelques éléments du langage conceptuel du réfrigérateur. On notera qu'on peut avoir plusieurs niveaux de précision du modèle. La première représentation (schéma 1 en haut à gauche) permet un dimensionnement grossier des échanges énergétique (Q_f = quantité de chaleur extraite; Q_c = quantité de chaleur produite); la seconde (schéma 2 en haut à droite) permet de positionner le cycle par rapport au diagramme de phase du fluide utilisé et de vérifier notamment que le cycle est «sûr» (ie évite les «coups de liquide» dans le compresseur) en s'assurant que tout le fluide est bien gazeux en entrée de compresseur; en bas (schéma 3 à 6): le schéma fait correspondre chaque phase du cycle à un composant de l'embodiment: en haut à gauche: la compression demande un compresseur, puis à droite la condensation utilise un condenseur, puis en bas à gauche la détente utilise une valve de détente et en bas à droite l'évaporation a lieu dans l'évaporateur.

À noter que pour l'instant nous n'avons fait que *décrire l'objet existant* (déjà connu, déjà conçu) dans chacun des langages. Le raisonnement de conception systématique appliqué à la conception d'un *nouveau* réfrigérateur prend une forme différente. Supposons qu'on ait à concevoir une nouvelle gamme de réfrigérateurs pour les personnes âgées. Le processus suit la logique suivante :

1. on commence par parcourir l'ensemble des fonctions possibles avant d'en sélectionner certaines, considérées comme pertinentes pour le nouveau produit (conservation de médicaments, conservation de repas préparés, etc.)
2. on s'interroge ensuite sur l'ensemble des designs conceptuels possibles pour le produit. À ce stade les concepteurs doivent en théorie étudier l'ensemble des technologies possibles : froid par cycle diphasique mais aussi froid par détente d'un gaz, froid par effet thermo-électrique (effet Peltier)...
3. une fois retenu l'un de ces principes, on s'attache à l'embodiment et ainsi de suite.

I.D. Outils et techniques associés

La structuration du raisonnement selon le modèle de la conception systématique a permis le développement de nombreux outils, associés à chacune des phases. Nous évoquerons ici trois types d'outils : l'analyse fonctionnelle, les catalogues pour la gestion de connaissances et la CAO.

I.D.1 - L'analyse fonctionnelle

Le langage fonctionnel est un des langages critiques de la conception systématique. Il permet de parler de l'objet sans évoquer les techniques de réalisation, donc de parler de l'objet alors qu'il n'est pas encore là et avec l'objectif de préserver des degrés de liberté pour les ingénieurs qui auront à le concevoir. Le langage fonctionnel porte aussi une logique de validation essentielle pour la conception. Une fonction doit pouvoir être validable, c'est-à-dire qu'elle doit être associée à un protocole qui permette cette validation.

Nous définirons une *fonction* comme *une condition d'existence ou de valeur d'un objet, du point de vue d'un observateur social concerné ou d'un environnement de l'objet*. Ce langage doit être aussi abstrait que possible lorsqu'il décrit les conditions d'existence ou de valeur pour éviter des solutions techniques *a priori* (« informer », « communiquer », « séduire ») mais doit être le plus spécifique et le plus concret

possible lorsqu'il s'agit de décrire l'environnement ou l'observateur («informer les handicapés moteur qui ne peuvent accéder au guichet...»), afin d'être pertinent en terme de validation.

On notera qu'un même objet peut réaliser plusieurs fonctions et qu'une même fonction peut mobiliser plusieurs objets.

L'hypothèse fondamentale de l'analyse fonctionnelle est qu'il existe un groupe minimal de fonctions qui qualifient l'objet et qui sont indépendantes de sa réalisation.

Exemple: «Description fonctionnelle d'un système de régulation de la circulation à un croisement de routes». Il faut pouvoir décrire les fonctions sans que l'on sache *a priori* si l'on va utiliser des feux de croisement ou un rond-point. Le lecteur pourra faire l'exercice lui-même. On trouvera par exemple :

- F_1 : le dispositif doit informer les automobilistes de l'existence du croisement
- F_2 : le dispositif doit permettre à chaque automobiliste de connaître les véhicules présents dans le croisement
- F_3 : il doit permettre à chaque automobile de prendre des décisions correctes lorsqu'il s'engage dans le croisement
- F_4 : il doit permettre de décrire clairement les règles de circulation et les infractions en cas de verbalisation (police)
- F_5 : le dispositif doit éviter au maximum les risques de collision...

Nous renvoyons à l'atelier d'analyse fonctionnelle pour des éléments plus détaillés.

Ce type d'analyse peut être raffiné à l'aide d'outils complémentaires. Ainsi une analyse fonctionnelle peut ensuite donner lieu à une *analyse de la valeur* conduisant à hiérarchiser les fonctions selon leur valeur client (voir les normes ISO récentes de «value management»). Hauser et Clausing (Hauser et Clausing 1988) ont proposé de structurer l'analyse fonctionnelle en une «house of quality», permettant de faire la relation entre les fonctions (les functional requirement, FR, en colonnes) et les «Customer attributes», ces derniers étant pondérés par rapport à l'offre de la concurrence (voir figure ci-après).

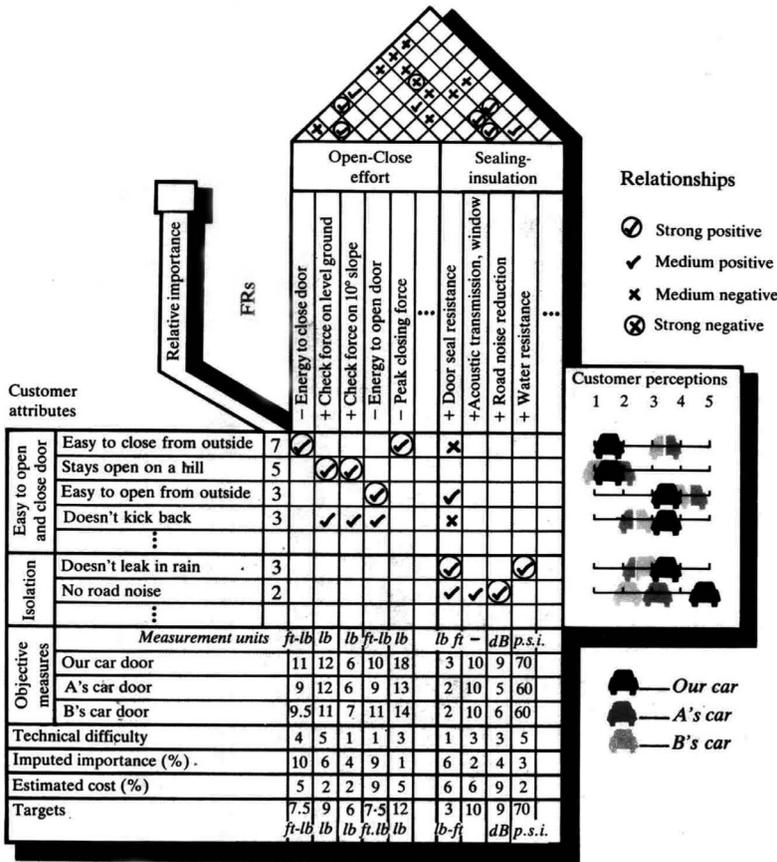


Figure 9: La « maison de la qualité » selon Hauser et Clausing 1988.

I.D.2 - Catalogues et gestion de la connaissance en conception systématique

Au raisonnement de conception systématique correspond une gestion des connaissances tout aussi systématique: la connaissance, pour être aisément activable, est organisée selon les langages de conception (connaissances sur les fonctions, sur le design conceptuel, sur l'embodiment, etc.) et, inversement, les connaissances acquises progressivement sont accumulées dans chacun de ces langages.

De la sorte le travail en conception systématique peut s'appuyer sur des connaissances *préparées*. On trouvera ainsi des catalogues sur les modèles conceptuels pour «stocker l'énergie» ou pour «changer de mode d'énergie» (voir ci-après). Le langage d'embodiment va lui aussi être structuré, notamment grâce à des listes de «recommandations» précises (voir ci-après les recommandations sur la facilité d'assemblage ou les recommandations pour le désassemblage pour la recyclabilité).

La structuration du raisonnement permet une gestion des connaissances qui surmonte systématiquement les deux obstacles classiques de la gestion des connaissances : difficulté d'utilisation et coût du stockage. Cela tient à la relation stricte entre étape de conception et type de connaissance (niveau fonctionnel, conceptuel, embodiment, détaillé) qui permet d'une part que l'utilisateur de connaissance sache immédiatement à quel type de connaissance recourir et, inversement, que la connaissance produite soit stockée dans le bon type pour être réutilisée efficacement.

Notons également que la connaissance n'est pas présentée comme elle l'est d'habitude dans les cours de sciences de l'ingénieur d'une école d'ingénieur regroupée par grandes disciplines, thermodynamique, électricité, etc. La conception systématique organisera les connaissances selon les langages de conception systématique. Par exemple en listant tous les modes de conversion de l'énergie (voir ci-dessous), (pour cela elle viendra chercher dans chaque science de l'ingénieur les phénomènes relevant de cette science et qui sont capable d'assurer une conversion d'énergie).

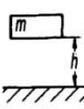
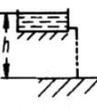
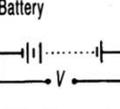
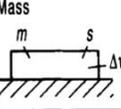
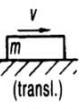
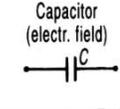
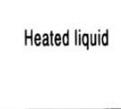
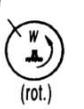
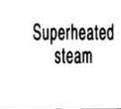
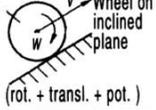
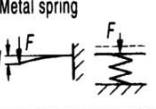
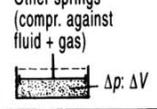
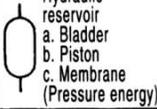
Type of energy	mechanical	hydraulic	electrical	thermal
Working principle				
1	 Pot. energy	 Liquid reservoir (pot. energy)	 Battery	 Mass
2	 Moving mass (transl.)	 Flowing liquid	 Capacitor (electr. field)	 Heated liquid
3	 Flywheel (rot.)			 Superheated steam
4	 Wheel on inclined plane (rot. + transl. + pot.)			
5	 Metal spring	 Other springs (compr. against fluid + gas) $\Delta p: \Delta V$		
6		 Hydraulic reservoir a. Bladder b. Piston c. Membrane (Pressure energy)		

Figure 10-a.

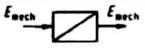
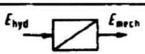
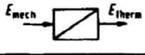
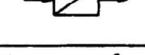
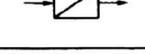
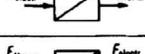
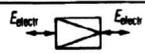
Function	Input	Output	Physical effects						
	Force, pressure, torque	Length angle	Hooke (Tension/compression/bending)	Shear, torsion	Uplift/Poisson's effect	Boyle-Marotte	Coulomb I and II	...	...
		Speed	Energy Law	Conservation of momentum	Conservation of angular momentum	...	...	...
		Acceleration	Newton's Law	...	...	...	...	...
	Length angle	Force, pressure, torque	Hooke	Shear, torsion	Gravity	Uplift	Boyle-Marotte	Capillary	
			Coulomb I and II	...	...	...	...	...
	Speed		Coriolis force	Conservation of momentum	Magnus-effect	Energy law	Centrifugal force	Eddy current	
Acceleration		Newton's Law	...	...	...	...	...	...
	Force, length, speed, pressure	Speed, pressure	Bernoulli	Viscosity (Newton)	Toricelli	Gravitational pressure	Boyle-Marotte	Conservation of momentum	...
	Speed	Force, length	Profile lift	Turbulence	Magnus-effect	Flow resistance	Back pressure	Reaction principle	...
	Force, speed	Temperature, quantity of heat	Friction (Coulomb)	1st law	Thomson-Joule	Hysteresis (damping)	Plastic deformation	...	...
	Temperature, heat	Force, pressure, length	Thermal expansion	Steam pressure	Gas Law	Osmotic pressure	...	...	...
	Voltage, current, magn. field	Force, speed, pressure	Biot-Savart-effect	Electrokinetic effect	Coulomb I	Capacitance effect	Johnsen-Rhabeck-effect	Piezoeffect	...
	Force, length, speed, pressure	Voltage, current	Induction	Electrokinetics	Electrodynamic effect	Piezoeffect	Frictional electricity	Capacitance effect	...
	Voltage, current	Temperature, heat	Joule heating	Peltier-effect	Electric arc	Eddy current	...	...	...
	Temperature, heat	Voltage, current	Electr. conduction	Thermo-effect	Thermionic emission	Pyroelectricity	Noise-effect	Semiconductor, Super-conductor	...
	Force, length, pressure, speed	Force, length, pressure, speed	Lever	Wedge	Poisson's effect	Friction	Crank	Hydraulic effect	...
	Pressure, speed	Pressure, speed	Continuity	Bernoulli	...	...	...	...	...
	Temperature, heat	Temperature, heat	Heat conduction	Convection	Radiation	Condensation	Evaporation	Freezing	...
	Voltage, current	Voltage, current	Transformer	Valve	Transistor	Transducer	Thermogalvanometer	Ohm's law	...
...

Figure 10-b: Différents principes pour le «stockage d'énergie» (figure 10-a) et pour le changement d'énergie (figure 10-b). (Source: (Pahl & Beitz 2006)).