



HAL
open science

Une approche paradigmatique de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes

Jean-Luc Wippler

► **To cite this version:**

Jean-Luc Wippler. Une approche paradigmatique de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes. Autre [cs.OH]. Université Paris Saclay (COMUE), 2018. Français. NNT : 2018SACLX083 . tel-01997661

HAL Id: tel-01997661

<https://pastel.hal.science/tel-01997661>

Submitted on 29 Jan 2019

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.

Une approche paradigmatique de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à l'École Polytechnique

École doctorale n°580 Sciences et technologies de l'information et de la
communication (STIC)
Spécialité de doctorat : Informatique

Thèse présentée à Palaiseau, le 19 novembre 2018, par

Mr. Jean-Luc Wippler

Composition du Jury :

Mr. Vincent Chapurlat Professeur, IMT Mines Alès	Président
Mme. Claude Baron Professeur des universités, INSA Toulouse	Rapporteur
Mr. Eric Bonjour Professeur des universités, Université de Lorraine, ENSGSI	Rapporteur
Mme. Marija Jankovic Professeur associé, CentraleSupélec	Examineur
Mr. Olivier de Weck Professeur, Massachusetts Institute of Technology	Examineur
Mr. Eric Goubault Professeur, École Polytechnique	Examineur
Mr. Dominique Luzeaux IGR, École Polytechnique	Directeur de thèse

Une approche paradigmatique de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes

Jean-Luc Wippler

© Copyright Jean-Luc Wippler – 2018

Certaines images utilisées dans ce manuscrit sont protégées par une licence © (*Creative Commons*).
Plus particulièrement :



© Gan Khoon Lay.



© Lluisa Iborra.



© Alice Noir et Yasser Magahed.

*À Éliisa, mon amour de toujours.
À Alfredo, il mio nonno, et à Luciano, mon parrain.*

«Perché l'architettura è tra tutte le arti quella che più arditamente cerca di riprodurre nel suo ritmo l'ordine dell'universo, che gli antichi chiamavano *kosmos*, e cioè ornato; in quanto è come un grande animale su cui rifulge la perfezione e la proporzione di tutte le sue membra. E sia lodate il Creatore Nostro che, come dice Agostino, ha stabilito tutte le cose in numero, peso e misura.»

« Car l'architecture est, d'entre tous les arts, celui qui cherche avec le plus de hardiesse à reproduire dans son rythme l'ordre de l'univers, que les anciens appelaient kosmos, à savoir orné, dans la mesure où elle est comme un grand animal sur lequel resplendit la perfection et la proportion de tous ses membres. Et soit loué Notre Créateur qui, comme disent les Écritures, a établi toutes les choses en nombre, poids et mesure. » (traduit de l'italien par Jean-Noël Schifano)

Umberto Eco, *le Nom de la Rose*

Remerciements

D'aucun disent qu'il s'agit de la partie la plus lue d'un manuscrit de thèse, et recommandent d'habillement peaufiner cette indispensable prose. Alors allons-y pour quelques flagorneries, flatteuses mais non obséquieuses, de circonstances.

Merci à Dominique, mon directeur de thèse qui est parvenu à me supporter pendant cette aventure. Je ne vais pas énumérer la liste interminable de ses savoirs et savoir-faire qui ont contribué à mes travaux. Dans la multitude de ses facilités, je ne citerais que sa capacité à maîtriser les langues étrangères, allant du *simple* allemand ou anglais, jusqu'au latin ou à l'égyptien hiéroglyphique (*sic* !) en passant par l'occitan ou le suédois. Alors je lui lance le défi de reconnaître les soixante différentes langues dans lesquelles je lui dis : merci !

Grazie, diolch, ευχαριστώ, dankon, mercé, mauruuru, dziękuję, takk, dhanyabad, благодарам, rahmat ou Рахмат, kia ora, köszönöm, hvala ou хвала, 謝謝, tangio tumas, waad mahadsantahay, trugarez (ou trugéré ou trugaré), go raibh maith agat, tapadh leat, spas, tashakor, motashakkeram, fofo, grâcies, gratias ago, бузныг, a dank, tualumba, terima kasih, takk fyrí, chnorakaloutioun, faleminderit, natôtela, mèsi, kiitos, matôndo, marahaba, welalin, Баярлалаа, teşekkür ederim, giitu, faafetai lava, ačiū, murakoze, gha-ana, gadda gey, bedankt, paldies, nizzik ħajr, спасибо, dákujem, děkuji, Баркал, sulpraáy, muļtūmesc, jërëjëf, wado, akiba, danke

Merci à Vincent, car il est coupable. Coupable de m'avoir convaincu, au fil de nos discussions et de nos échanges, de me lancer dans cette aventure malgré mon âge quelque peu avancé.

Merci à Thierry. Les longues discussions lors de nos libations houblonesques n'ont pas réussi à épuiser le paradigme FCF d'E. Crawley dont il sera question dans ce manuscrit.

Merci à Saint Jérôme dont une magnifique gravure siège au-dessus du bureau sur lequel j'ai passé le plus clair du temps consacré à la rédaction de ce manuscrit. Je veux croire qu'un des premiers docteurs de l'histoire m'aura inspiré.

Merci à Guillaume de m'avoir éclairé et suggéré de me tourner vers saint Augustin, alors que j'étais embarrassé et confus quant à la notion de temps si primordiale en architecture.

Merci à Claude, Daniel et Nabil de m'avoir fait confiance en me confiant quelques vacances dans des cycles ingénieurs où il était question de... conception architecturale.

Et surtout merci à Éliisa d'avoir cru en moi et de m'avoir soutenu tout au long de cette aventure.

Et puis, merci à : AC/DC, Bryan Adams, Adele, Bernard Allison, Art of Noise, B 52's, Bach, The Bangles, The Beach Boys, Beethoven, Georges Benson, Michel Berger, Birdy, The Black Keys, The Blues Brothers, Boccherini, Michael Bolton, Joe Bonamassa, Brahms, Loonie Brooks, J.J. Cale, John Campbell, Owen Campbell, Jean-Patrick Capdevielle, Chicago, Chopin, Poppa Chubby, Eric Clapton, Gary Clark, Jr., The Clash, Joe Cocker, Coldplay, Lloyd Cole and the Commotions, Paolo Conte, Ry Cooder, Beverley Craven, The Cranberries (RIP Dolores O'Riordan), Creedence Clearwater Revival, Christopher Cross, The Crystal Method, Dead can dance, Depeche Mode, Bill Deraime, Dire Straits, The Doors, Doves, Dvořák, Bob Dylan, Eagles, Enya, Evanescence, Donald Fagen, Dr. Feelgood, Fleetwood Mac, Dan Fogelberg, John Fogerty, Robben Ford, Michael Franks, Franz Ferdinand, Peter Gabriel, Serge Gainsbourg, Gilberto Gil, Grieg, Buddy Guy, Haendel, Johnny Hallyday, Haydn, Heart, Jimmi Hendrix, John Lee Hooker, Billy Idol, Indochine, The Inmates, Chris Isaak, Jamiroquai, Jarabe de Palo, Al Jarreau, Jason and the Scorchers, Michael Johnson, Rickie Lee Jones, BB King, The Kinsey Report, Kraftwerk, Bill LaBounty, Jonny Lang, Bernard Lavilliers, Led Zeppelin, Level 42, Liszt, M, Michael Mc Donald, Loonie Mack, Malher, Mano Negra, Marilyn Manson, Bob Marley, Maurane, John Cougar Mellencamp, Metallica, Mike + The Mechanics, Mr. Mister, Eddy Mitchell, Gary Moore, Alannah Myles, Les Negresses Vertes, Nickelback, Stevie Nicks, Nightwish, Nirvana, No Doubt, Pachelbel, The Alan Parsons project, Laura Pausini, Pergolese, Paul Personne, Lucky Peterson, Pink Floyd, Police, The Pretty Reckless, Prokofiev, Quaterflash,

Queen, Rachmaninov, Rage against the machine, Rainbirds, Rammstein, Chris Rea, Red Hot Chili Peppers, Rita Mitsouko, Rolling Stones, Rossini, David Sanborn, Emeli Sande, Véronique Sansom, Joe Satriani, Scalarti, Schubert, Schumman, Beverly Jo Scott, The Silencers, Simple Minds, Steely Dan, Sting, Selah Sue, Big Ed Sullivan, Supertramp, Hound Dog Taylor, Koko Taylor, Téléphone, Texas, Georges Thorogood and the Destroyers, Rob Tognoni, Toto, TriggerFinger, KT Tunstall, Stevie Ray Vaughan and the Double Trouble, Verdi, Vivaldi, VRP, Wanton Bishops, Muddy Waters, Tonny Joe White, David Wilcox, Bruce Willis, Johnny Winter, Steve Winwood, Stevie Wonder, Neil Young, Zucchero Sugar Fornaciari, et ZZTop pour m'avoir musicalement accompagné durant la rédaction de mon manuscrit.

Table des matières

Remerciements	vii
Table des définitions	xiii
1 Prolégomènes	1
1.1 Système	2
1.2 Architecture	4
1.2.1 Première approche	4
1.2.2 Recherche plus étendue	6
1.2.3 Étude synonymique	7
1.3 Conception	14
1.3.1 Où la situer ?	14
1.3.2 Des définitions et des modèles	18
1.3.3 Synthèse	42
2 Faire émerger la conception architecturale	45
2.1 Le contexte initial : l'ingénierie système	46
2.1.1 Historique	46
2.1.2 Tentatives de définition	50
2.1.3 Particularités	53
2.2 Ingénierie et Architecture	55
2.2.1 Système et Architecture	55
2.2.2 Faire de l'ingénierie et architecturer	56
2.3 Distinguer l'architecture	59
2.3.1 Décisions architecturales	59
2.3.2 Les modes de raisonnement de l'architecte	62
2.3.3 Complexité et nécessité de l'architecture	65
2.4 Viser un paradigme de la conception architecturale	70
2.4.1 Des défis	70
2.4.2 Des bénéfiques	72
2.4.3 Une démarche	73
3 Construire un paradigme de la conception architecturale	75
3.1 Le paradigme FCF d'E. Crawley	76
3.1.1 La fonction	76
3.1.2 Le concept	81
3.1.3 La forme	83
3.1.4 Critique du FCF d'E. Crawley	84
3.2 Le cadre FBS de J. Gero et ses extensions	85

3.2.1	Le FBS	85
3.2.2	Le FBS situé	87
3.2.3	Critique du FBS de J. Gero et ses extensions	93
3.3	Première bissociation : $FCF \oplus FBS$	97
3.3.1	Paradigme simplifié	97
3.3.2	Paradigme augmenté	102
3.4	Le paradigme (analytico)systemique de D. Claeys	107
3.5	Deuxième bissociation : $GC^3FB^2 \oplus$ Paradigme (analytico)systemique de D. Claeys	117
3.5.1	<i>Tempus rerum imperator</i>	118
3.5.2	Les différents espaces	119
3.5.3	L'architecte : observateur et acteur	120
3.5.4	Processus et opérations	120
3.6	Synthèse	122
4	Définir une démarche de la conception architecturale	127
4.1	Fondements	128
4.1.1	Nature et fonction des éléments	128
4.1.2	Espaces	129
4.1.3	Modèles	132
4.1.4	Modèles et espaces	134
4.1.5	Modèles et temps	137
4.1.6	Modèles et qualité	138
4.1.7	Modèles et organisation	141
4.1.8	Processus et opérations	144
4.1.9	Processus et modèles	145
4.2	Démarche de conception architecturale	146
4.2.1	Conceptualisation	146
4.2.2	Archétype de la conception architecturale	147
4.2.3	Niveau général	150
4.2.4	Retour sur la respiration	156
4.2.5	Niveau particulier	161
4.3	Synthèse	172
5	Appliquer : <i>Safe City</i>	175
5.1	Vers une <i>ville plus sûre</i>	176
5.1.1	Le défi d'une <i>ville plus sûre</i>	176
5.1.2	Aborder la conception architecturale d'une <i>ville plus sûre</i>	177
5.2	Mise en œuvre des différents PRO Processus	178
5.2.1	PRO Cadrage/Pilotage	178
5.2.2	PRO Désignation	180
5.2.3	PRO Contextualisation	183
5.2.4	PRO Détermination	188
5.2.5	PRO Clarification	191
5.2.6	PRO Prospection	194
5.3	Synthèse et conclusion : démarche de conception architecturale	196
6	Conclusion et perspectives	199
	Annexes	207

A	Frises historiques	209
A.1	Frises détaillées	210
A.2	Frises thématiques	215
B	Compléments sur la forme	219
B.1	Décomposition structurelle et organisation	220
B.1.1	Les trois <i>P</i>	220
B.1.2	Organisation récursive en sous-systèmes	220
B.1.3	Holarchie	224
B.1.4	Synthèse sur la structure de la forme	226
B.2	Liens et relations	226
B.2.1	Lien	226
B.2.2	Relation	227
C	Description d'architecture	229
C.1	Objectifs d'une description de l'architecture	230
C.2	Comment représenter une architecture ?	231
C.3	Cadres d'architecture	235
C.4	Élargir nos modes de représentation	237
D	Analyses lexicographique et sémantique	239
D.1	Système	240
D.2	Architecture	246
D.3	Conception	250
D.4	Contexte	253
D.5	But	256
D.6	Capacité	259
D.7	Forme	263
D.8	Comportement	269
D.9	Concept	272
	Bibliographie	275

Table des définitions

1.1	Architecture \simeq Vision	5
1.2	Architecture \simeq Hypothèse	7
1.3	Architecture \simeq Vision	8
1.4	Architecture \simeq Contradiction surmontée	11
3.1	Architecture (E. Crawley)	76
3.2	Principe morphogénétique	82
3.3	Principe exégétique	82
3.4	Principe synchronique	82
3.5	Principe diachronique	83
3.6	Forme (E. Crawley)	83
3.7	Architecture (premier paradigme simplifié)	97
3.8	Architecture (paradigme augmenté)	103
4.1	Processus élémentaire de la conception	129
4.2	Définir la qualité d'un modèle	140
4.3	Effet d'un processus élémentaire de conception (1/2)	140
4.4	Ensemble des artefacts d'un modèle	142
4.5	Surface d'un modèle	142
4.6	Ensemble des attributs caractérisant les artefacts d'un modèle	142
4.7	Dimensions d'un modèle	143
4.8	Archétype de la conception architecturale	148
4.9	Convergence de la conception architecturale	149
4.10	Effet d'un processus élémentaire de conception (2/2)	161
4.11	Contour surfacique d'un modèle	161
4.12	Contour dimensionnel d'un modèle	163
B.1	Système (selon M. Bunge)	222
B.2	Sous-système (selon M. Bunge)	222
B.3	Système	223
B.4	Sous-système	223
C.1	Principe d'abstraction	232
C.2	Principe de raffinement	233
C.3	Principe de filtrage	233
C.4	Principe partitif	233
C.5	Principe restrictif	234
C.6	Carte locale	234
C.7	Atlas	234

Chapitre 1

Prolégomènes

« Les systèmes sont les fictions du génie de chaque philosophe. »

Sénèque

Quelques concepts clés de cette thèse méritent que nous leur consacrons un examen préliminaire assez approfondi.

En nous plaçant dans le champ des systèmes artificiels complexes, nous rappellerons brièvement cette notion abstraite de système.

En focalisant notre thèse sur la conception architecturale, les notions clés d'architecture et de conception se doivent de faire l'objet d'une attention toute particulière, d'autant plus que parfois ces notions sont opposées¹. Convenons pour notre part que le terme d'architecture, d'origine ancienne étant avant tout relatif aux édifices, son usage dans le domaine des systèmes artificiels complexes dépasse largement le simple recours à l'analogie ou la métonymie. Nous explorerons diverses interprétations de cette notion d'architecture et mettrons en avant son caractère polysémique.

La démarche de conception n'est pas propre à un domaine particulier, même si le terme anglo-saxon de design peut prêter à confusion : démarche ou domaine ? Si le champ de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes reste largement à défricher, il n'en est rien pour d'autres domaines. Sans nous éparpiller plus que de raison, nous concentrerons notre effort à rassembler, puis synthétiser les contributions en matière de démarche de conception essentiellement dans les domaines de la conception de produits ou de systèmes. Notre exploration s'étalera du début des années soixante à nos jours. Notre posture systémique permettra d'en dégager des principes qui seront applicables à notre contexte.

Sommaire

1.1	Système	2
1.2	Architecture	4
1.3	Conception	14

1. La récente révision du standard phare en ingénierie des systèmes [ISO15] a remplacé le sous-processus d' « *architectural design* » (une traduction anglo-saxonne possible de conception architecturale) par deux sous-processus séparés « *architecture definition* » et « *design definition* ». Ce terme d' « *architectural design* » tend à être écarté des publications officielles de la communauté d'ingénierie des systèmes..

1.1 Système

La notion de système est une notion très ancienne (philosophie, métaphysique. . .). Elle a donné lieu à l'approche systémique : étude des modèles et des principes abstraits d'organisation du monde et de ses phénomènes, dans une approche indépendante de la nature physique des entités constituantes².

Il y a maintes définitions du terme et du concept de système. Le terme a d'ailleurs tendance à être utilisé à toutes les sauces. Le lecteur pourra se reporter à l'annexe traitant des analyses lexicographique et sémantique des termes clés de ce manuscrit pour davantage de détails sur le terme *système* et explorer la variété des usages (cf. annexe D.1 page 240). Les théories systémiques et plus particulièrement la théorie générale du système de Ludwig Von Bertalanffy [Ber50, Ber69], et tous ceux qui vont lui succéder, sont des tentatives pour donner une sémantique plus précise à cette notion de *système*.

La norme ISO/IEC/IEEE 15288 :2015 définit un système comme "A combination of interacting system elements organized to achieve one or more stated purposes" [ISO15], définition équivalente à la définition de Joël de Rosnay « *un ensemble d'éléments, en interaction dynamique, organisés en fonction des buts* » [dR77]. Nous pouvons également la rapprocher de la définition de Jean-Louis Le Moigne : « *Quelque chose qui fait quelque chose (activité = fonction) et qui est doté d'une structure, qui évolue dans le temps, dans quelque chose (environnement) pour quelque chose (finalité)* » [LM90].

La définition de Joël de Rosnay condense en une seule phrase les aspects essentiels de cette notion de système :

Aspect téléologique Le système *sert* à quelque chose, il tend vers un but.

Aspect structurel Le système n'est pas réduit à un seul élément ou à un simple *tas* (ensemble) d'élément, mais un ensemble d'éléments *reliés, organisés* entre eux. Notons que la définition de Jean-Louis Le Moigne apporte un aspect complémentaire en déclarant le caractère dynamique de la structure.

Aspect comportemental Les éléments constitutifs d'un système interagissent entre eux pour produire un(des) comportement(s) (émergence) censé(s) tendre vers le but. C'est là une des différences fondamentales entre l'approche systémique qui se concentre sur les interactions entre les éléments en considérant les effets de ces interactions, et l'approche analytique qui est isolationniste en considérant les éléments un à un, et en ne s'intéressant qu'aux types ou catégories d'interactions entre ces éléments.

Premières caractéristiques essentielles :

Non-séparabilité Un système n'est pas un ermite ! Il ne *vit* jamais tout seul, il évolue dans un contexte environnant, il interagit avec d'autres systèmes. Il n'est donc jamais isolé. Un élément n'ayant de relations ou d'interactions avec aucun autre ne peut donc constituer *a priori*³ un système. Notons que cet environnement du système peut évoluer dans le temps (dynamique du contexte).

2. Les paradigmes de la systémique ont évolué au cours du temps : abandon du paradigme cartésien, au profit d'un paradigme cybernétique dans les années 40 (systèmes régulés), le plus répandu, et de ses diverses variantes, puis évolution vers des paradigmes téléonomique (systèmes finalisés) voire téléologique (systèmes évolutifs, intégrant et pouvant transformer leur propre finalité).

3. Si l'on exclut le système vide – qui ne présente que peu d'intérêt dans notre manuscrit – ou l'univers tout entier – hors du champ des systèmes artificiels complexes de ce manuscrit –.

Non-additivité	Un système ne peut être réductible à la seule somme (ou réunion) de ses éléments constitutifs. Suivant la célèbre maxime d'Aristote, tirée de la Métaphysique, « <i>la totalité est plus que la somme des parties</i> ». Certaines propriétés du <i>tout</i> ne peuvent pas être déterminées par la seule connaissance des propriétés de chacun des éléments (et leur simple combinaison additive), mais s'appuient également sur les interactions qui existent entre ces divers éléments. L'exemple classique est celui de la masse réelle d'un noyau d'un atome qui est toujours inférieure à la somme des masses de ses constituants, le défaut de masse étant dans l'énergie de cohésion du noyau (ce qui lie les constituants entre eux). Précisons aussi que le tout peut être <i>moins</i> que la somme de ses parties, car la mise en relation des parties va supprimer certains degrés de liberté que ces parties étaient susceptibles d'avoir. En fait, la maxime d'Aristote doit être ici interprétée comme : « <i>le tout est autre que la somme de ses parties</i> ». Le célèbre article d'Anderson, <i>More is different</i> [And72] permet d'approfondir cette notion.
Cohérence interne et structuration	Un système possède sa propre structure : il est composé d'un certain nombre d'éléments entretenant des relations. L'ensemble de ces relations, certaines pouvant être statiques (ne changeant pas avec le temps), d'autres dynamiques (évoluant avec le temps), forme la structure du système. Un simple agrégat d'éléments ne constitue pas un système. En effet, les éléments du système forment un ensemble cohérent, et même si chacun de ces éléments peut être vu comme une simple parcelle du système, avec son identité propre (fonction, nature...), il participe et contribue au but du système, via les relations qu'il entretient avec les autres éléments (et l'environnement).
Frontière	Ayant déterminé précédemment l'environnement avec lequel le système interagit, la frontière est le lieu de séparation entre éléments internes et éléments externes. Cette frontière est perméable, le système interagissant avec des éléments externes par l'entremise d'interfaces. Elle est aussi mouvante, de par les évolutions du système et de son environnement (ce qui est aujourd'hui une composante externe peut être demain interne, et réciproquement).
Finalité	Sans rentrer dans un débat philosophique sur la différence entre téléologie et téléonomie, il convient de souligner l'importance de la finalité dans la définition du système.

Nous pouvons condenser tout cela en l'aphorisme suivant :



Point important 1.1

[Un système est une émergence]

Le système est une émergence particulière. Quand des éléments sont structurés et composés entre eux au travers d'interactions, pour atteindre un but, ce qui émerge c'est un système.

Afin d'illustrer les notions introduites précédemment, prenons un hôpital comme exemple de système (cet exemple a été traité par l'auteur dans [LRW15]).

En tant que système il doit être considéré en relation avec d'autres éléments : les médecins, les urgentistes, les pompiers, les familles des patients, la sécurité sociale, l'état civil, les représentants des religions, les collectivités locales, des laboratoires d'analyse, des sociétés d'approvisionnement pharmaceutiques, des sociétés d'enlèvement et de traitement des déchets... Une ingénierie système d'un hôpital ne pourrait l'envisager comme étant un élément isolé.

Bien que l'hôpital soit constitué de différents services indépendants sur le plan organisationnel et ayant leur propre autonomie, son intelligibilité dans ses fonctions principales (prévention en termes de santé, qualité des soins aux patients, contribution à la garantie de sécurité sanitaire) ne peut se déduire de la seule énonciation ou compréhension des divers services constitutifs, mais bel et bien de la manière dont ceux-ci coopèrent.

Un hôpital possède une enceinte (frontière physique) qui marque une extension foncière ou territoriale du système, ainsi qu'un périmètre fonctionnel et de responsabilité dans la prise en charge des patients (frontière fonctionnelle et limite de responsabilité), un cadre légal et administratif (un hôpital est un établissement public de santé entrant dans la catégorie des établissements publics de l'État, employant un certain nombre de personnes sous différents statuts et contrats).

Un hôpital expose de nombreuses interfaces avec les entités externes avec lesquelles il interagit. Citons seulement à titre d'exemple l'interface (que nous connaissons bien sous le terme des *urgences*) entre l'hôpital et les services urgentistes, les pompiers ou les patients se présentant spontanément. Il s'agit d'un *point de contact et de transfert* du système ; c'est une des entremises pour *entrer dans le système*, le langage consacré parlant d'*admission*. Cette interface revêt plusieurs formes : à la fois physique (au travers d'un quai pour les véhicules d'intervention et de sas, ou de salles et de dispositifs pour l'accueil des blessés et malades), et à la fois protocolaire (protocole d'admission, protocole de sortie).

Au fur et à mesure des réformes de santé, les modalités d'accès à l'hôpital changent, le périmètre d'intervention évolue (fermeture ou ouverture de services), bref les moyens de réaliser la finalité évoluent.

1.2 Architecture

1.2.1 Première approche

La notion d'architecture est une notion très ancienne qui remonte à plusieurs millénaires. Imhotep (III^e millénaire avant notre ère, crédité d'être l'inventeur des pyramides en pierres) est souvent considéré comme un des plus anciens architectes connus, et Vitruve (1^{er} siècle avant J.-C.) nous a laissé en héritage le premier traité d'architecture connu [Vit15].

Nous nous efforcerons de vouloir donner une définition et signification formelle à ce concept d'architecture. D'emblée, restreignons-nous à notre domaine, celui de l'ingénierie des systèmes artificiels et identifions une ou des propositions adéquates. Commençons par les deux définitions suivantes qui ont une place particulière dans la littérature :

“Fundamental concepts or properties of a system in its environment embodied in its elements, relationships, and in the principles of its design and evolution.” [ISO11]

“The embodiment of concept, and the allocation of physical/informational function to elements of form, and definition of interfaces among the elements and with the surrounding context.” [Cra07]

Nous reviendrons sur ces définitions de l'architecture, la dernière en particulier, dans les chapitres ultérieurs et la traduirons en un paradigme de l'architecture système.

D'après le dictionnaire de l'Académie française (cf. annexe D.2 page 246), nous retiendrons que le recours au terme d'*architecture* est un usage analogique et métonymique du vocable.

D'emblée, remarquons que ce substantif recouvre dans la langue française deux significations :

- l'architecture en tant que discipline⁴ ;
- une production intellectuelle, le résultat du travail de l'architecte⁵.

P. Boudon pointe cette différence fondamentale dans son approche épistémologique de l'espace architectural : « *La différence [...] entre architecture comme terrain d'étude et architecture comme objet est donc une première distinction fondamentale à poser d'un point de vue épistémologique si l'on veut éviter la confusion des genres.* » [Bou03]

Dans la suite, nous entendrons par architecture, le second signifié, à savoir une œuvre intellectuelle. Et dans ce cas, la question qui s'impose est : « *En quoi consiste cette production ?* », bref un premier pas vers son ontologie. Tentons une première esquisse.

Une architecture c'est la vision, la connaissance minimale à partager traduisant à la fois le cadrage de l'opportunité⁶ en question et son orientation. Une formulation de la raison d'être de l'architecture serait alors :



Définition 1.1

[Architecture \simeq Vision]

Élaborer une architecture, c'est : « Cadrer l'opportunité, façonner le futur ». (“Frame the opportunity, Shape the future” [LMW15])

De manière plus extensionnelle, le cadrage de l'opportunité comprendrait a minima les éléments de réponse à :

- Quels sont les enjeux ?
- Quelles sont les contraintes majeures et a minima de l'ensemble des différentes parties prenantes à considérer ?
- Quelles sont les tensions, les contradictions, les antagonismes, les ambiguïtés ? que révèle l'interprétation de la situation ?

4. Nous ne nous interrogerons pas sur le caractère de cette discipline dans ce manuscrit, et en particulier nous ne traiterons pas du caractère scientifique ou non. Nous renvoyons sur les divers ouvrages de P. Boudon [BDPS00, Bou03] qui a consacré une part importante de son travail à produire une épistémologie de l'architecture.

5. « *Architecture is what architects do.* » (Cedric Price).

6. Nous aurions pu utiliser plus classiquement le terme de *problème*. Nous avons intentionnellement choisi le terme d'opportunité pour deux raisons. D'une part comme la définition d'une architecture implique, voire engage, un panel de parties prenantes assez vaste (dont le client et les usages, ou le marketing, la stratégie, la finance. . .) cela donne une vision plus positive. D'autre part, cela permet de ne pas d'emblée tomber dans le travers qui consisterait à réduire et cantonner la conception architecturale à une approche méthodologique de résolution de problèmes. « *Architecture should have little to do with problem solving – rather it should create desirable conditions and opportunities hitherto thought impossible.* » (Cedric Price, *The square book*) « *So that is another rule for the whole nature of architecture : it must create new appetites, new hungers-not solve problems, architecture is too slow to solve problems.* » (Cedric Price, *Re : CP*, ed. by Hans-Ulrich Obrist (Basel : Birkhäuser, 2003). p. 57.).

- Que savons-nous ?
- Que ne savons-nous pas ?

De même, l'orientation, la vision, l'idée d'un futur s'appuierait sur quelques propositions :

- Quels sont les grands principes, les grandes idées, les grands concepts qui pourraient/devraient diriger l'élaboration/le développement de la solution ?
- Pourquoi cette vision du futur est-elle ingénieuse, singulière, enthousiasmante ? Pourquoi allons-nous y adhérer ?
- Quelles sont les autres alternatives d'architectures qui envisageables ? Ou dans quel espace peuvent-elles se situer ?
- Quelles sont les autres idées envisagées par d'autres (par mes pairs, mes concurrents ?) ?
- Quelles sont les décisions architecturales clés prises et à prendre ?

1.2.2 Recherche plus étendue

En butinant dans diverses sources (blogs, journaux, conférences, gazouillis...), voici un florilège de définitions ou de tentatives.

Dans son article "Who needs an architect?" [Fow03], Martin Fowler se trouve embarrassé devant les termes d'architecte et d'architecture.

"[...] "architect" and "architecture" are terribly overloaded words. For many, the term "software architect" fits perfectly with the smug controlling image at the end of *Matrix Reloaded*. [...] I define architecture as a word we use when we want to talk about design but want to puff it up to make it sound important." [Fow03]

Il relate plusieurs définitions, toutes critiquables. La première telle que proposée par un groupe de standardisation :

"The RUP, working off the IEEE definition, defines architecture as "the highest level concept of a system in its environment. The architecture of a software system (at a given point in time) is its organization or structure of significant components interacting through interfaces, those components being composed of successively smaller components and interfaces." [Fow03]

Celle-ci ayant un point de vue résolument développeur, et non utilisateur. Les deux suivantes sont issues d'une critique de Ralph Johnson à cette définition :

"So, a better definition would be "In most successful software projects, the expert developers working on that project have a shared understanding of the system design. This shared understanding is called 'architecture.' [...]" [Fow03]

"There is another style of definition of architecture which is something like "architecture is the set of design decisions that must be made early in a project." [Fow03]

Pour conclure, sur une formule plutôt lapidaire, mais pour le moins opérante.

« So, this makes it hard to tell people how to describe their architecture. "Tell us what is important." Architecture is about the important stuff. Whatever that is. »

Martin Fowler, 2003

D'autres reprennent l'idée qu'une architecture est déterminée par les décisions *importantes*.

« *All architecture is design but not all design is architecture. Architecture represents the significant design decisions that shape a system, where significant is measured by cost of change.* »

Grady Booch, blog post, Mars 2006

“What decisions does the architect make?”

Architecturally significant ones

“What is architecturally significant?”

The architect decides!

Ruth Malan, blog post, A Trace in the Sand, 2017

« *Architectural decisions are those that must be made from an overall system perspective.* »

Ruth Malan and Dana Bredemeyer, Less is More with Minimalist Architecture, IT Pro, IEEE, Sep./Oct. 2002

1.2.3 Étude synonymique

Tentons d'aborder le caractère polysémique de l'architecture à travers une analyse synonymique.

Architecture,
synonyme
d'hypothèse

“Architecture is a hypothesis, that needs to be proven by implementation and measurement” [Gil13] Une architecture est une construction mentale d'un monde non encore incarné, mais pensé, imaginé, simulé, bref une hypothèse. Nous ne prendrons pas ici le terme hypothèse dans sa signification en logique formelle, c.-à-d. antécédent d'une proposition⁷. Nous nous rapprocherons plutôt de son sens en sciences : « *une proposition d'explication à un phénomène donné* ». Une telle hypothèse sera dite scientifique si elle peut être testée (vérifiée, réfutée. . .). Nous tordons légèrement cette définition pour en formuler une adaptée à notre objet d'étude.



Définition 1.2

[Architecture \simeq Hypothèse]

Une architecture est une proposition de changement ou d'évolution dans le futur afin de répondre à un objectif donné.

Cette proposition de modification peut recouvrir différents aspects, tous liés à la nature artificielle des systèmes traités : technologique, structurelle, opérative, sociale, politique. . . Comme une hypothèse scientifique, une *bonne* architecture, en tant qu'hypothèse se doit :

- de permettre une forme de test ou d'expérimentation, ici nous dirions une simulation (cf. section 4.2.3 page 150) ;
- de permettre d'élaborer des formes de prédiction (par exemple, de type « *et si ?* ») par le raisonnement ;
- d'avoir un caractère économe, parcimonieux.

7. Dans la proposition « *Si P alors Q* », P dénote une hypothèse, Q la conséquence.

Architecture,
synonyme de vision,
d'orientation

L'architecture est ce qui informe un ensemble de parties prenantes à la fois sur la compréhension de l'opportunité dans l'intégralité de ces dimensions et à la fois sur la manière d'apporter une réponse à l'opportunité à laquelle elles sont confrontées. Ceci implique qu'une architecture soit dans le juste nécessaire en matière de granularité et de précision de l'information (nul besoin d'informations trop détaillées qui noieraient les différentes parties prenantes), mais suffisamment large pour que chacun y trouve son compte.



Définition 1.3

[Architecture \simeq Vision]

Une architecture est l'ensemble d'informations *a minima* qui permet à l'ensemble des parties prenantes impliquées de partager une vision commune de l'opportunité actuelle et de son(s) futur(s).

Cette vision peut se décliner dans différentes modalités (pictographique, diagrammatique, littéraire. . .), toutes n'ayant pas la même valeur opérative.

Le travail ultérieur de l'ingénierie (et d'autres activités comme l'industrialisation, la production, le déploiement et la mise en service, le maintien en condition opérationnelle. . .) consistera alors, après appropriation de cette vision *gros grain* de la solution, à la compléter, la raffiner, la décomposer, la transformer. . .

Architecture,
synonyme
d'organisation

Architecturer des éléments entre eux peut être interprété comme les organiser suivant des principes, des schémas. Un ensemble, ou simple agrégat d'éléments ne constituant pas un système permettant d'atteindre un but, c'est bel et bien dans la manière de (p)lier les éléments entre eux (système compliqué), ou de les tisser, les enchevêtrer (système complexe) qu'émergera le comportement permettant d'aboutir au but escompté⁸.

Cette organisation peut être déclinée suivant plusieurs axes ou plusieurs niveaux d'abstraction : opérationnel, services, fonctionnel, physique. . . Un des niveaux d'organisation peut correspondre au regroupement des éléments en une partition structurée (des sous-systèmes), consistant ainsi à organiser hiérarchiquement le système sur un ou plusieurs niveaux. Habituellement, de cette organisation récursive du système en sous-système découle l'organisation des ingénieries aux différents niveaux.

L'exemple ci-après (cf. figure 1.1 page suivante) montre deux partitions différentes du même ensemble d'éléments possédant les mêmes liens entre eux. D'apparence la deuxième solution est *mieux* organisée que la première.

En s'inspirant des propos de Weaver [Wea48], nous pouvons paraphraser cela de la sorte : « *La complexité ne se simplifie pas, elle s'organise !* ». L'architecture est alors la traduction de cette organisation.

8. Étymologiquement, *complexe* s'oppose à *compliqué* : le premier a pour racine « *ple* » signifiant « *tresser* » ; le second a pour racine « *pli* » signifiant « *plier* ».

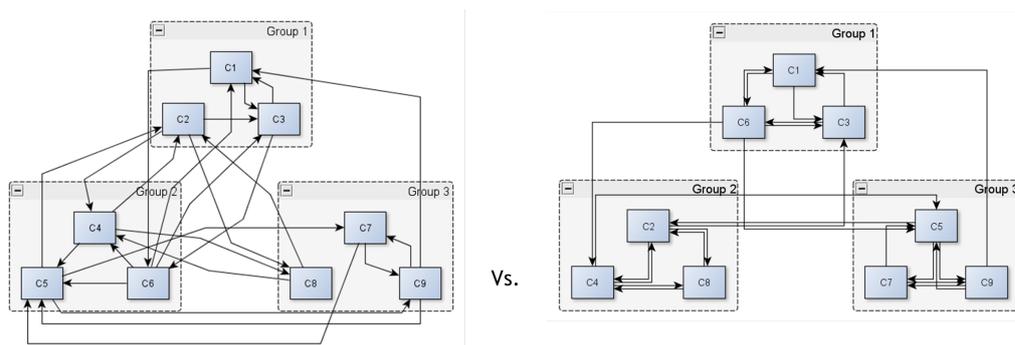


Figure 1.1: Différentes organisations, différentes architectures

Architecture,
synonyme de
composition

L'architecture apparaît alors comme le résultat explicite des opérations consistant à assembler (ou exclure) des éléments entre eux, les rassembler, hiérarchiquement ou non, les lier entre eux. . . afin de *composer* un tout cohérent et signifiant. Le terme de *composition* est d'ailleurs lui-même employé pour désigner la conception d'une œuvre artistique, et particulièrement dans le domaine de la musique, où le créateur d'une œuvre musicale est un compositeur.

Poursuivant l'analogie musicale, la composition précède l'interprétation ou la réalisation d'une œuvre. Dans certains cas, la composition est retouchée pendant sa réalisation, ou sa production. Par exemple, il n'est pas rare que le scénariste d'un film ou d'une série retouche telle ou telle scène pendant la production. Cependant il s'agit là le plus souvent de modifications mineures n'altérant pas la cohérence ou l'intégrité globale.

Cette idée de composition renvoie à l'idée qu'il existe des principes directeurs et un art de la composition. Dans le domaine de l'architecture en bâtiment, nous trouvons des principes tels : la proportion, l'équilibre, le contraste, la symétrie, la circulation. Dans celui de la musique, les disciplines tels l'harmonie, la mélodie, le rythme permettent de *bien composer*.

Architecture,
synonyme de
principes (ou de
règles)

Si l'on accepte l'idée qu'une architecture est le substrat antérieur, voire primordial, de tout développement de système faisant l'objet d'une ingénierie, alors on peut facilement envisager que son expression soit avant tout intentionnelle, avant que d'être extensionnelle. Dans ce cas, l'expression intentionnelle d'une architecture pourrait se résumer à un ensemble de principes (ou de règles). À ce stade, nous considérons que ces deux modalités se ressemblent, en privilégiant l'usage de *principes*.

Robert McKee dans son ouvrage de référence sur « *Comment écrire un bon film hollywoodien* » [McK14], que nous pouvons interpréter comme « *comment élaborer une bonne architecture dans le monde du cinéma* », établit la différence suivante entre règles et principes que nous pouvons reprendre à notre compte :

“Story is about principles, not rules. [. . .] A rule says, “You must do it this way”. A principle says “This works. . . and has through all remembered time”. The difference is crucial. Your work needn't be modelled after the “well-made” play; rather, it must be well made within the principles that shape our art. Anxious, inexperienced writers obey rules. Rebellious, unschooled writers break rules. Artists master the form.” [McK14]

TOGAF (*The Open Group Architecture Framework*) [For18] a proposé le recours aux principes pour l'usage et le déploiement de ressources informatiques dans une entreprise, constituant ainsi un catalogue de principes d'architecture d'entreprise. Comme évoqué, nous pouvons dans une première approche confondre ces principes avec une première ébauche de l'architecture. Voici quelques exemples de principes prélevés dans TOGAF 9.2 [For18] :

- primauté des principes ;
- orientation service ;
- les données sont la valeur ;
- les données sont partagées ;
- les données sont accessibles ;
- les données sont de confiance ;
- etc.

Architecture,
synonyme de
réconciliation

L'architecture est le lieu où l'on tente de *tout* réconcilier pour en produire un *modèle* unifié et cohérent qui permet à tout à chacun d'exposer et donc de partager son point de vue avec les autres parties prenantes concernées. Par *point de vue* nous embrassons ici à la fois la compréhension de l'opportunité (ce que nous en attendons, quels sont les motivations et les enjeux à s'y impliquer, quels bénéfices et désagréments nous en tirons) et la manière de contribuer à sa résolution (quelles sont les contraintes minima que nous souhaitons imposer à la solution, quels concepts, quelle connaissance pertinente mobiliser, quels idées et points de départ pour aller vers une solution).

L'architecture se doit alors de produire une synthèse opérante de ces diverses informations.

Architecture,
synonyme
d'équilibre

"Architecture is the servant of the Priority Stakeholder Values." [Gil13] L'architecture se doit de concrétiser sous forme d'un compromis acceptable la satisfaction en termes de valeur, des attentes des différentes parties prenantes. En ce sens, l'architecture se doit de traduire un parti-pris, explicite ou non, mais assumé, qui privilégie un ou plusieurs axes de valeur, et défavorise d'autres. Cela reprend également l'idée que concevoir se doit d'atteindre un bon équilibre, plutôt que résoudre un problème [SRE09], ce qui reprend une idée initiale d'Alexander [Ale64] : ce dernier défend une approche basée sur l'identification et l'affrontement des inadéquations (*misfits*) entre les attentes et les capacités délivrées par une forme (une *solution*) dans un contexte donné. À partir de là, est développée l'idée qu'une situation donnée peut être vue comme un ensemble de forces, potentiellement contradictoires, dont la solution (le *design*) proposée atteint un sorte d'équilibre. Le travail du concepteur (de l'architecte dans notre cas) serait alors d'agir sur ces forces pour favoriser (*forcer*) dynamiquement un nouvel équilibre créateur de valeur pour les parties prenantes (cf. figure 1.2 page ci-contre).

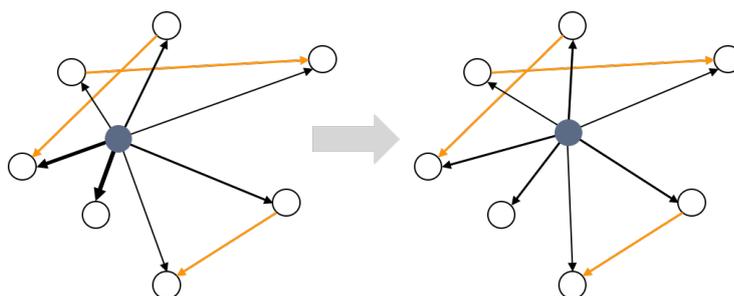


Figure 1.2: Équilibres, selon [SRE09]. En recourant à l'analogie mécanique des forces – ou des ressorts – la solution conçue – le point bleu plein – passe d'un état de tension, instable – à gauche – à un état d'équilibre – à droite –

Architecture,
synonyme de
contradiction
surmontée

L'architecte fait face à des situations complexes où les ambiguïtés, voire les contradictions sont fréquentes. Nous connaissons tous des situations où une même partie prenante, ou plusieurs, réclament des objectifs contradictoires. Le « *Il faut que cela soit plus performant et en même temps moins cher* » est devenu un classique du genre. Là où les logiques classiques échouent à se sortir de ce qui correspond pour elles à des paradoxes, l'architecte est amené à mettre en œuvre des approches ne reposant pas *a priori* sur ces logiques classiques, bref une forme d'irrationalité au sein d'un paradigme du raisonnement hérité de la tradition aristotélicienne. De nombreux ouvrages sur l'architecture décrivent l'architecte comme un mélange et un aboutissement entre art subjectif et raisonnement objectif [Lov12]. L'architecte surmontant ces difficultés par son côté parfois irrationnel, une architecture devient une solution à une ou des contradictions établies.

Nous pouvons donner cette nouvelle définition complémentaire d'une architecture.



Définition 1.4

[Architecture \simeq Contradiction surmontée]

Une *bonne* architecture est une solution à une contradiction apparente.

Exemple : Queen Mary II

L'exemple du Queen Mary II nous donne une illustration très pertinente de cette vision de l'architecture surmontant les contradictions. Le documentaire du National Geographic [Meg08] montre la première ébauche élaborée par l'architecte naval Stephen Payne. Le transatlantique a alors une forme 'classique' et tient dans un volume défini par les diverses contraintes. La hauteur maximale est déterminée par la hauteur sous le pont Verrazano de New-York, la largeur par celle du canal de Panama, et la longueur par la capacité de manœuvre dans la baie de Southampton. L'armateur, Micky Arison demande alors « *Où sont les balcons ?* ». Ce à quoi Payne lui rétorque que sur un transatlantique, il ne peut y avoir de balcon^a.

a. Contrairement à un paquebot qui effectue du cabotage, la traversée de l'Atlantique ou d'autres océans implique d'avoir un bateau suffisamment stable et de garantir la sécurité des passagers y compris par mauvais temps. En plein océan, un transatlantique n'a d'autres options que de continuer sa route, alors que la plupart des paquebots ne sont jamais à plus de 24h d'un port dans lequel ils peuvent se réfugier en cas de gros grain.

Micky Arison tentant au travers du Queen Mary II de relancer le marché de la traversée de l'Atlantique, pari risqué alors que ce marché a été pratiquement anéanti par l'essor de transport aérien, veut miser sur le luxe et le côté inoubliable. Bref, il veut des balcons pour plus de la moitié des passagers, et n'en démordra pas, menaçant d'arrêter le programme s'il n'obtient pas gain de cause. Pour augmenter le nombre de balcons, Payne n'a d'autres solutions que de rajouter des ponts en hauteur. Cela ne sera pas sans conséquence, et une des plus majeures sera certainement celle d'élargir le navire pour lui assurer la stabilité voulue, et ce en renonçant au canal de Panama, c.-à-d. en outrepassant une des contraintes majoritaires initialement posées. Nous pouvons synthétiser la contradiction apparente initiale, pour un transatlantique respectant les contraintes $h(\text{Verrazano}) \times I(\text{Panama}) \times L(\text{Southampton})$ de la manière suivante :

transatlantique → pas de balcons
 pas de balcons → pas de transatlantique

Sortir de cette contradiction obligera à être *illogique* (dans son sens premier) et à renoncer à certains points tenus pour indispensables. Comme l'ensemble des contraintes *indispensables* ne peuvent être toutes satisfaites conjointement, il faudra lâcher sur une, posant ainsi un compromis de valeur entièrement assumé, ce qui ne sera pas sans conséquence^a.

a. Le documentaire sur le Queen Mary II [Meg08] permet de découvrir certaines de ces conséquences, et des travaux complémentaires d'architecture et d'ingénierie que cela a nécessité.

Architecture,
synonyme d'ADN

En partant de la théorie générale du système et plus particulièrement des travaux de von Bertalanffy [Ber69], Boardman et Sauser vont proposer un renforcement du concept de système, par analogie avec la génomique [SBB08, BSV09]. Ils partent du constat que les sciences de la biologie ont largement plus profité des progrès de la systémique, que l'ingénierie système elle-même. En particulier leurs avancées en termes d'émergence et d'architecture doivent permettre d'*exporter* un concept pour les systèmes technologiques. Qu'est que les systèmes artificiels ont en commun ? Leur première réponse est... une architecture.

Du coup, nous pouvons la condenser, l'abstraire sous forme d'un ADN, c.-à-d. avec des structures de bases et des règles de composition. Refusant la démarche réductionniste, et s'inspirant de la biologie, ils avancent un certain nombre de visions et de construction propre à un système. Pour eux, tout système artificiel se comprend par sa forme (éléments et structure) et sa fonction (son comportement, son utilité), et la *parfaite* adéquation de la forme à la fonction (systèmes bien conçus). Les systèmes artificiels ont une forme d'organisation privilégiée, conséquence de la manière dont est appliquée l'ingénierie des systèmes, à savoir la hiérarchie. Mais c'est loin d'être la seule, et d'autres structures ont su montrer des caractéristiques remarquables (flexibilité, robustesse, évolutivité...).

Ils s'intéressent principalement à la notion de cohésion, d'unité (*togetherness*) caractéristique essentielle qui à leurs yeux traduit une *bonne* architecture. Leur base conceptuelle tient en cinq éléments :

- autonomie (la capacité à faire ses propres choix);

- appartenance (peut être aussi *abstraite* que l'est le système d'appartenance) ;
- connectivité (les interactions avec autrui, indépendamment de l'appartenance à tel ou tel système) ;
- diversité (suivant différentes dimensions : technologique, interfaces. . .) ;
- émergence.

Ils en tirent une vision holonique des éléments d'un système, chaque élément étant à la fois une partie et un tout. Ils utilisent l'analogie d'une sphère (cf. figure 1.3) pour exhiber cette continuité entre tout et partie.

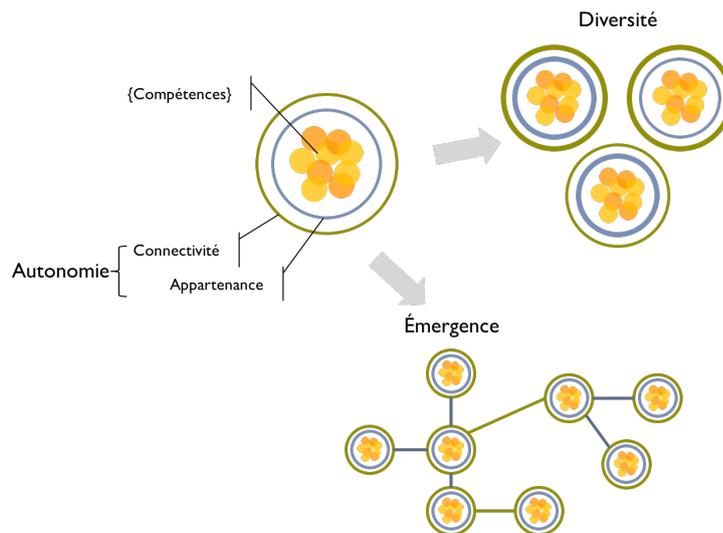


Figure 1.3: L'ADN d'un système, selon [BSV09]. La sphère – ici projetée en deux dimensions – est employée comme analogie pour représenter un holon avec les caractéristiques énoncées : connectivité, appartenance, autonomie. Les *compétences* représentent les parties constitutives du tout, ce qu'il contient, ce qu'il embarque. La diversité se traduit par différentes connectivités, appartenance, compétences. L'émergence provient de l'interaction d'un ensemble structuré d'holons.

Architecture,
synonyme de
(graphe causal de)
décisions

Cela fait quelque temps que cette idée (re)surgit, à savoir que la conception est une activité rythmée par des prises de décisions successives et liées. Cette idée a été plus particulièrement creusée par les travaux du MIT sous la houlette du Prof. E. Crawley. Lors d'un symposium sur les futurs systèmes lunaires de la NASA, il déclare : "System Architects transform a set of needs and goals into an architecture for a system. They do this by making decisions. An architecture can be represented as a set of decisions and by doing so, the architect can gain useful insight into the space of feasible architectures." [Cra09]

De remarquables travaux vont venir étayer cette position. B. Koo [Koo05] pose des fondements de cette démarche en introduisant OPN (*Object-Process Network*). L'idée éminente de sa thèse est de montrer la supériorité et la nécessité de doter les architectes d'un métalangage de l'architecture.

"OPN provides three supporting aspects of architectural modeling. As a declarative language, OPN provides a diagrammatic formal language to help architects specify the

space of architectural options. As an imperative language, OPN automates the process of creating architectural option instances and computes associated performance metrics for those instances. As a simulation language, OPN uses a function-algebraic model to subsume and compose discrete, continuous, and probabilistic events within one unified execution engine.” [Koo05]

Dans les travaux qui suivirent, notons la thèse de W. Simmons [Sim08], qui ajoutera à ces fondations une démarche : ADG (*Architecture Decision Graph*).

“[...] a computational framework for decision support called the Architecture Decision Graph framework. It supports human decision-making by providing a methodology for generating and analyzing architectures as the result of a set of interrelated decisions. ADG’s explicit representation of an interconnected decision problem is a bipartite graph of decision variables, property variables, logical constraints, and property functions. The Architecture Decision Graph’s framework provides tools for reasoning about the structure of a decision problem, generating the set of feasible combinations of decisions, and simulating their outcome. The underlying computational engine used by ADG is the Object-Process Network (OPN) kernel.” [Sim08]

Cette idée qu’une architecture peut se ramener au graphe de décisions dont elle découle connaît quelques défenseurs : Anton Jansen et Jan Bosh [JB05, vdVJNB06] ainsi que Jeff Tyree et Art Akerman [TA05] dans le domaine de l’architecture logicielle. Certains vont tenter de donner une sémantique plus formelle à ces décisions comme Philippe Kruchten qui cherchera à en faire une ontologie [Kru04] ou D. Selva, B. Cameron et E. Crawley qui chercheront à en extraire des motifs [SCC17].

Nous reprendrons cette idée dans le cadrage et le pilotage de la conception architecturale (cf. section 4.2.3 page 153), que nous suggérons de rythmer, entre autres, par l’enchaînement causal des décisions architecturales.

1.3 Conception

« *La conception est ce qui précède la réalisation, l’avènement.* » Pouvons-nous nous contenter de cet aphorisme pour comprendre ce que recouvre la conception ? À l’évidence, non. Pour autant la cerner, n’est pas chose aisée, et une première étude lexicale (cf. annexe D.3 page 250) ne dégage pas d’image claire. Pour appréhender cette notion, nous allons devoir emprunter un parcours et une recherche suffisamment larges. Pour commencer ce voyage, nous soumettons au lecteur ces deux citations.

« *Everyone designs who devises courses of action aimed at changing existing situations into preferred ones* »

Herbert Simon, *The Science of Design : Creating the Artificial, Design Issues*, The MIT Press, Vol. 4, 1988

« *Design is a mix of craft, science, storytelling, propaganda, and philosophy.* »

Erik Adigard, *WIRED*, Jan. 2001

1.3.1 Où la situer ?

Souvent la démarche de conception est assimilée à une démarche de résolution de problèmes. Cette vision sera applicable et opérante dans le cadre de la conception système, mais réductrice dans le cadre de la conception architecturale. P. Boudon [Bou04] s’est interrogé sur cette notion et selon lui la conception

relève d'une forme de processus, et comporte donc un certain nombre d'opérations que tout concepteur met en œuvre (consciemment ou inconsciemment, implicitement ou explicitement, mais ceci est un autre débat).

Énonçons pour notre part qu'elle consiste à passer de la perception d'une situation courante à une ou des propositions d'orientation de futurs plausibles et possibles. En cela, l'architecture devient l'artéfact principal de la conception architecturale; réciproquement, la conception architecturale peut être vue comme la maïeutique de l'architecture. Nous voulons ici répondre à la dichotomie habituelle entre espace du problème et espace de la solution, qui tend à promouvoir une approche spatialisée, et trop orientée résolution de problèmes, en adoptant une perspective plus temporelle : partant de la situation existante actuelle dans laquelle s'inscrit l'opportunité (ce que l'on appelle souvent suivant l'usage anglo-saxon le "as is"), visant une ou des situations attendues futures possibles et plausibles, dans un avenir à court/moyen terme (le "to be") ou à plus long terme ou plus stratégique (le "should be"), la conception est une ou des propositions de chemins pour aller du présent aux futurs.

Cette vision ancre la conception architecturale des systèmes complexes dans le réel par son accrochage et son point de référencement à la situation actuelle : une architecture ne se conçoit pas *ex nihilo* et part toujours d'un point de départ existant. Cela rapproche la conception architecturale des systèmes complexes de celle des bâtiments : un bâtiment s'inscrit toujours dans un cadre, une situation géographique, historique, culturelle, politique, sociologique, environnementale, réglementaire. . .

Elle est à rapprocher d'autres pensées telles celle d'H.Simon : "designing is an activity that plans to intentionally alter the world." [Sim69], et de J.K. Page (cité par J.C. Jones dans *Design Methods* [Jon70]) : "the imaginative jump from present facts to future possibilities."

La conception architecturale est en général une œuvre collective et coordonnée, rassemblant plusieurs acteurs de différents métiers (approche multidisciplinaire). Les pratiques de conception diffèrent suivant les entreprises, les personnes impliquées (la part du talent des concepteurs) et la nature du problème à traiter.

Nous reproduisons l'énoncé des différents types de conception tel qu'effectué dans [LRW11]

Les facteurs qui influent majoritairement sur la démarche de conception sont :

- la disponibilité ou non d'une base de connaissance ;
- la disponibilité ou non d'une méthodologie de résolution.

À cela nous pouvons rajouter :

- la nécessité ou non d'acquérir de nouvelles connaissances au-delà de la base de connaissance déjà acquise, pour permettre la résolution du problème.

Il peut être également intéressant de mettre cela en perspective par rapport aux classes de comportement humain, donc de celle du ou des concepteurs, suivant l'importance qu'ils accordent à l'activité mentale d'après la taxinomie des comportements humains SRK (*Skill – Rule – Knowledge*) de Rasmussen :

- le comportement *machinal* (*skill-based behaviour*) : reproduction de comportements maîtrisés ne nécessitant pas d'activité mentale consciente ;
- le comportement *procédural* (*rule-based behaviour*) : consistant à exécuter de manière consciente des tâches coordonnées en suivant des règles ou des procédures ;
- le comportement *basé sur la connaissance* (*knowledge-based behaviour*) : comportement basé sur une activité mentale consciente et complexe afin de planifier et résoudre quand aucune règle ne permet de la faire : c.-à-d. trouver soi-même la solution.

Tout cela nous amène à distinguer les typologies de démarche suivantes :

- la conception routinière qui fournit une solution à un nouveau problème en se basant totalement sur des solutions existantes, dans la plupart des cas cataloguées,
- la re-conception qui répond à de nouvelles exigences en partant d'une solution déjà existante dans le but d'améliorer ses performances ou de la corriger,
- la conception adaptative qui permet de garder les fonctionnalités initiales en adaptant l'architecture suite à l'apparition de nouvelles exigences,
- la conception de variantes qui permet de décliner un produit existant en une gamme,
- la conception innovante qui permet de combiner des éléments ou des connaissances existants afin de développer un nouveau produit,
- la conception stratégique qui permet de développer des connaissances nouvelles : des résultats ou des applications produits de la recherche fondamentale,
- la conception créative où l'objet à concevoir est défini d'une façon abstraite et où la connaissance et les méthodologies de résolution sont jusque-là inconnues en conception.

En utilisant et prolongeant les facteurs influençants, nous pouvons répartir les typologies de conception selon deux axes :

- un axe de la connaissance catégorisé en :
 - à **construire** les connaissances sont à découvrir ;
 - à **s'approprier** les connaissances existent, mais ne sont pas encore maîtrisées par le groupe de concepteurs concerné ;
 - connues** les connaissances sont acquises ou facilement accessibles et exploitables ;
- un axe de la méthode de résolution : connue ou non.

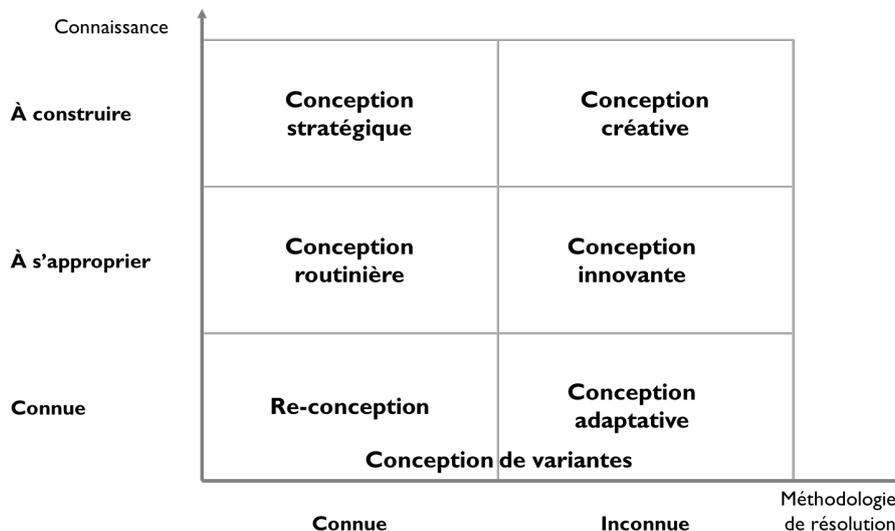


Figure 1.4: Les différents types de conception

Pour compléter cette vue, nous incluons ici un extrait de la thèse de S. Huot, *Une nouvelle approche pour la conception créative : De l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions non-standard* [Huo05].

D'un point de vue global, les problèmes de conception sont par essence « *mal définis* » : la solution est un système qui doit satisfaire un ensemble de contraintes très peu définies au départ et spécifiées tout au long du processus. Les études et analyses de Vinod Goël⁹ ont permis de caractériser les démarches invariantes mises en jeux par des concepteurs lors de la résolution de ces problèmes larges et complexes :

1. Ils montrent une activité intense de structuration et de restructuration du problème.
2. Ils développent plusieurs modèles du système (traduit par des diagrammes, prototypes).
3. Les problèmes peuvent être résolus par un ensemble de solutions plus ou moins acceptables que le concepteur doit alors évaluer. Cela implique la mise en œuvre de fonctions d'évaluation.
4. Cette évaluation est cyclique et s'effectue par approximations successives.
5. Les concepteurs ont tendance à préciser progressivement les contours du système, laissant ainsi la place à des alternatives.
6. Ils décomposent le problème en modules perméables ayant des intersections et des liens plus ou moins forts.
7. Leur démarche évolue de buts abstraits aux spécifications concrètes en passant par des abstractions de plus en plus spécifiques.
8. Ils utilisent des systèmes symboliques ou graphiques pour décrire les résultats intermédiaires.

[Huo05]

Nous pouvons aller un peu plus loin, au-delà du problème mal défini, par le constat que le concepteur dans le domaine de l'architecture, que nous pouvons extrapoler au domaine des systèmes artificiels complexes fait constamment face à l'incertain, et que la découverte d'alternatives peut également procéder de l'aléatoire, ou de la sérendipité. Il en découle une difficulté si nous cherchons à vouloir rationaliser de manière forcenée la démarche de conception. Damien Claeys met ces éléments en exergue dans un article au nom évocateur : *Concevoir un projet d'architecture. Calmer les certitudes, gérer l'incertitude* [Cla15], dont nous citons ici un extrait évocateur

Ce qui est découvert par le concepteur n'est pas le résultat de la simple application de savoirs disciplinaires, mais implique la capacité du concepteur à interpréter des traces et des signes. Il doit être capable de garder son esprit disponible pour respectivement percevoir, questionner, interpréter, comprendre et exploiter les données surprenantes et déroutantes qui font irruption dans le processus de projection. [...] La modélisation des effets de l'incertitude, de l'usage du pseudo hasard et de la pratique de l'abduction est une thématique de recherche encore peu de la conception architecturale. Une recherche approfondie d'identification des déclencheurs de la sérendipité ne serait-elle pas nécessaire ?

9. Vinod Goël et Peter Pirolli. Motivating the notion of generic design within information-processing theory : The design problem space. *AI Magazine*, 10(1) :19-36, 1989.

Encart 1.1

[Art ou Science? La réponse de D. Claeys[Cl11]]

Une question canonique agite les théoriciens de notre domaine :
 « Est-ce que l'architecture est un art ou une science ? »
 En effet, parallèlement aux incessants aléas socioculturels et aux changements de paradigmes, certains pensent que la conception architecturale est un acte *créatif* impossible à percer, tandis que d'autres pensent qu'il est possible de (re-)construire le processus *scientifiquement*^a. Nous pensons que cette dualité *apparente* doit être dépassée. Outre ces deux postures théoriques récurrentes, John Ch. Jones [Jon69] avait déjà prophétisé une troisième voie possible, qui annonçait les modèles « *réflexifs* » de la conception. Voici ces trois postures :

1. Le « *concepteur-magicien* » : cette posture caricaturait les obscurantistes, les vitalistes et les *boîtes noires* de la première cybernétique. Ils *croient* au mystère de l'acte créatif pur.
2. Le « *concepteur-ordinateur* » : cette posture caricaturait les scientifiques, les mécanistes et les *boîtes de verre*. Ils *analysent* des chaînes causales, pour *décrire* des opérations mentales.
3. Le « *concepteur-auto-organisé* » : dans cette posture, dont John Ch. Jones annonçait l'émergence, le concepteur s'interroge *réflexivement* sur le *contexte* d'apparition de la connaissance.

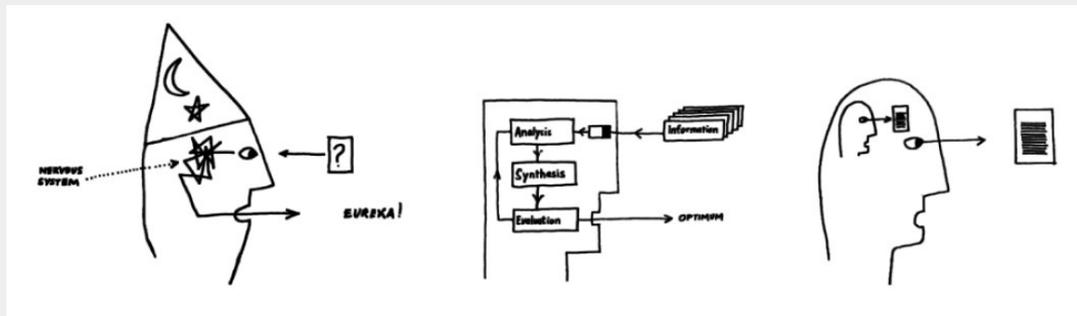


Figure 1.5: Les trois caricatures de John Ch. Jones [Jon69]

a. « Dans son travail, l'architecte réunit ce que chacun des points de vue sépare. Ainsi faut-il plutôt envisager la conception comme un système complexe, pouvant être rendue intelligible par un travail de modélisation *a priori*, plutôt que comme l'addition de différents points de vue réducteurs dans une sorte de conjonction alchimique... la démarche architecturologique tente de rendre compte de la diversité des modalités de décision dans une cohérence globale (un modèle). » [BDPS00].

1.3.2 Des définitions et des modèles

Processus et motifs élémentaires

Avant de faire le tour de quelques démarches de conception remarquables, examinons tout d'abord les motifs élémentaires du processus de conception. Réduit à sa plus simple expression, un processus c'est un ensemble d'actions coordonnées (ou pas) qui transforme une entrée en une sortie (moyennant des ressources et du temps) (cf. figure 1.6 page ci-contre).



Figure 1.6: Modèle basique d'un processus

Les différents motifs de bases qui vont constituer notre *vocabulaire* de base pour décrire les processus de conception sont énoncés ci-après.

De la magie ?

Tim Brennan provoque en répondant à la question « *Comment vous travaillez ?* » : “Here’s how we work. Somebody calls up with a project; we do some stuff; and the money follows.” Son schéma explicatif (cf. figure 1.7) n’est pas si simpliste qu’il n’y paraît. Nous pouvons en tirer les enseignements suivants :

- la conception est un processus boîte noire irréductible, par essence ;
- la conception incorpore une part d’aléatoire, de divertissement, de non reproductible. Cette part est certainement prépondérante ;
- la conception est un processus itératif (traduit par les boucles qu’il dessine).

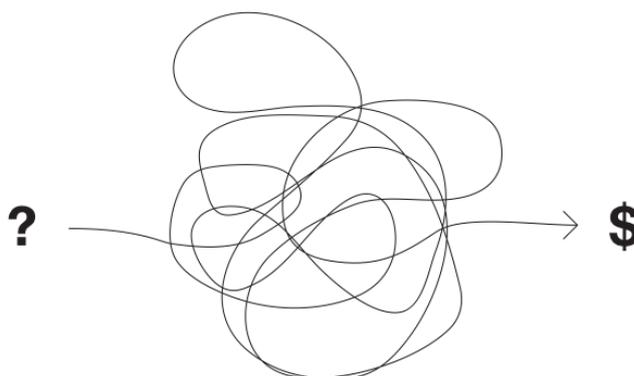


Figure 1.7: La démarche de conception selon Tim Brennan

Néanmoins nous établirons quelques motifs élémentaires, forcément simplificateurs pour nous permettre de verbaliser des démarches de conception. Un processus étant un ensemble structuré, coordonné d’actions, regardons comment ces actions s’enchaînent et se parlent les unes aux autres. Pour des raisons de lisibilité, nous réduirons l’ensemble des actions à seulement deux actions dans la suite.

séquentialité	Nous pouvons décrire deux actions comme étant successives, c.-à-d. se déroulant l’une après l’autre (cf. figure 1.8a page suivante).
simultanéité	Nous pouvons décrire deux actions comme étant concourantes, c.-à-d. se déroulant l’une en même temps que l’autre (cf. figure 1.8b page suivante).
oscillations	Le processus peut osciller entre les deux actions (cf. figure 1.8c page suivante).
bouclage	Les actions du processus peuvent boucler les unes sur les autres, c.-à-d. la sortie de l’une sert à alimenter l’entrée de l’autre et réciproquement (cf. figure 1.8d page suivante).

- passage progressif Le processus passe graduellement d'une action à l'autre. À tout moment, les deux sont effectuées, mais l'importance relative de l'une s'accroît progressivement alors que l'autre décroît (cf. figure 1.8e).
- récurtivité Chaque action peut elle-même être considérée comme un processus et donc se réexprimer récursivement en tant que tel (cf. figure 1.8f).

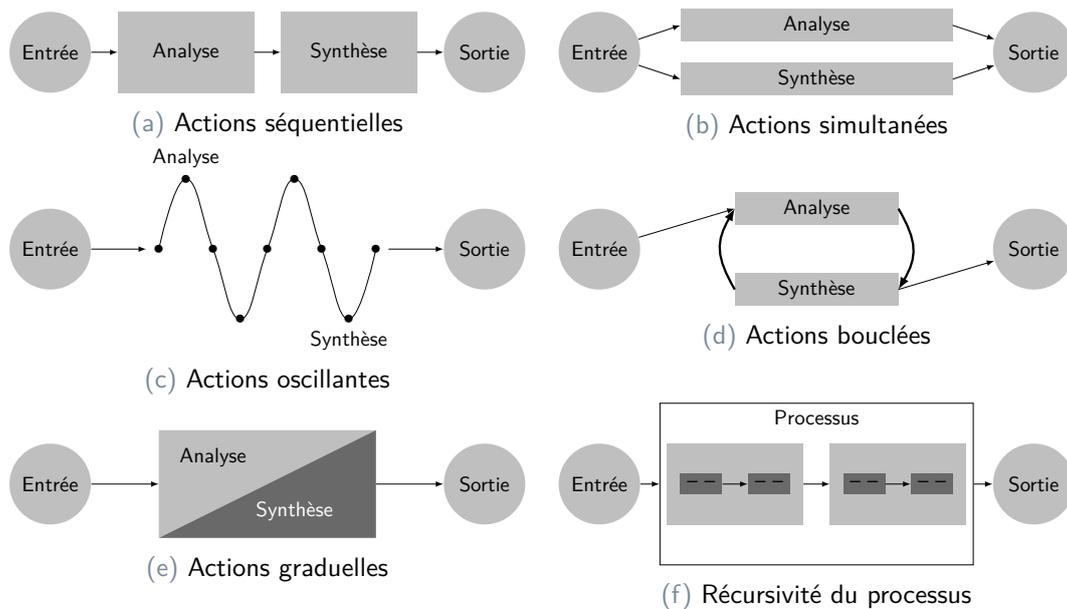


Figure 1.8: Motifs élémentaires d'actions d'un processus

Nous avons toujours pris comme exemple de couple d'action le couple (analyse, synthèse). D'autres couples reviennent fréquemment et se révèlent être des motifs récurrents dans les démarches de conception. En voici une liste non exhaustive.

- (analyse, synthèse) L'analyse consiste à partitionner la situation ou le problème en plus petites parties, pour les examiner chacune séparément, puis la synthèse réassemble la situation ou la solution basée sur les résultats et ce que nous avons pu tirer de l'examen de chacune des parties.
- (décomposition, recombposition) L'objet de départ (situation, problème...) est divisé en sous-objets (dont nous espérons qu'ils constituent une partition cohérente et complète) jusqu'à un niveau de granularité jugé convenable, puis une fois que chaque fragment élémentaire a été transformé (par exemple, qu'une solution individuelle à un sous-problème élémentaire a été trouvée), l'ensemble résultant est recombinaison pour former une proposition globale et complète.
- (divergence, convergence) Ce motif tend à devenir un motif commun et répandu de toute démarche créative. À partir d'un point de départ, différentes options, alternatives, idées sont produites (ouverture, divergence), puis au fur et à mesure cet ensemble se resserre (élimination par rejet ou sélection d'éléments) pour converger vers une situation réputée acceptable ou convenable (fermeture, convergence).

Démarches particulières

Nous exposons ici de manière succincte quelques démarches particulières de conception. Nous nous sommes inspiré et avons emprunté la plupart des figures à la monographie effectuée par Hugh Dubberly [Dub04]. Toutes ne sont pas au même niveau, et à chacune d'entre elles se poserait la question de définir ce qu'est la conception (*design*), ce qu'est une méthode de conception (*design method*), un processus de conception (*design process*), ainsi qu'une théorie de la conception (*design theory*). Acceptons l'idée que nous procédions ici à un étalage qui pourrait apparaître par certains côtés comme disparate. Et que de cette recherche et exploration en largeur nous tirions par suite quelques synthèses. Nous procédons ici à la fois d'une démarche de catégorisation (nous proposons de regrouper les diverses propositions en quatre catégories) et d'une démarche de recherche de sens, bref inductive, qui nous permettra d'abstraire un certain nombre de principes ou de motifs.

De notre parcours en largeur des différentes démarches et approches de la conception, nous proposons la catégorisation suivante :

- les précurseurs ;
- les schématiques ;
- les métaphoriques ;
- les théoriciens.

Les précurseurs

Décréter qui sont les précurseurs dans le domaine de la conception de produits et de systèmes est une tâche ardue et la sélection proposée nous expose à des critiques. Nous avons procédé de la sorte pour aboutir à ce tableau des précurseurs. Nous avons d'abord fait confiance au travail de recherche de Nigan Bayazit concernant quarante années de recherche dans le domaine de la conception [Bay04], puis extrait ceux qui nous semblaient être les plus représentatifs. Ne voulant pas nous risquer dans une quelconque classification, voire une hiérarchie de ces personnages, nous les présentons dans l'ordre alphabétique, ce qui sera également le cas pour les autres catégories exposées.

Christopher
Alexander

Dans son livre phare, *Notes on the Synthesis of Form* [Ale64], Alexander décrit trois situations types de conception :

- non consciente (*unselfconscious*), où l'artisan travaille *en direct* dans le monde réel, sans se rendre compte de manière consciente de l'interaction permanente entre contexte et forme ;
- consciente (*self-conscious*), où la conception et la réalisation sont clairement séparées. La forme est façonnée au travers de l'image mentale, conceptuelle que se fait le concepteur du contexte, et d'idées et de dessins qui permettent d'établir la forme ;
- médiée (*mediated*), qui est une version augmentée de la précédente, où le concepteur abstrait et formalise ses images mentales afin d'en produire des représentations partageables et critiquables par autrui.

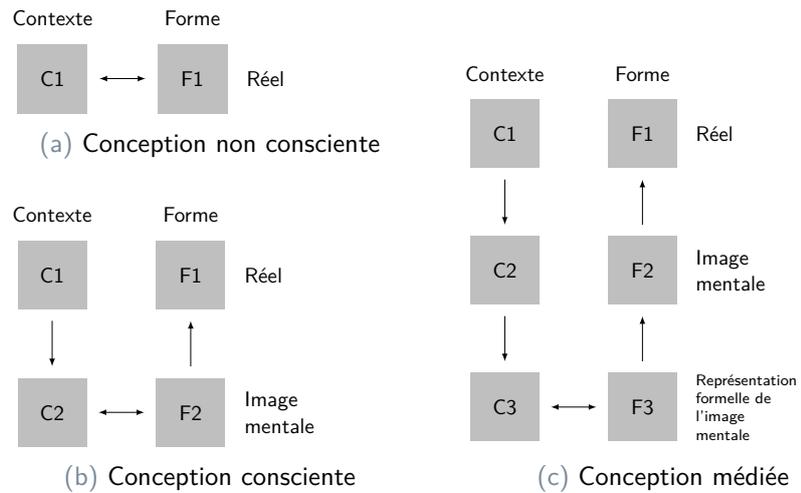


Figure 1.9: Situations de Conception selon C. Alexander

Bruce Archer

L. Bruce Archer a enseigné à la Hochschule für Gestaltung à Ulm (HfG Ulm), puis a dirigé la Design Research Unit au Royal College of Art (RCA) de Londres. Son ouvrage paru en 1965 [Arc65] expose sa méthode et sa démarche formalisée sur l'analyse de chemin critique ou PERT (cf. figure 1.11 page ci-contre). Sa réflexion vis-à-vis de la démarche de conception mérite d'être notée : "When all has been said and done about defining design problems and analyzing design data, there still remains the real crux of the act of designing – the creative leap from pondering the question to finding a solution. [...] If we accept that value judgments cannot be the same for all people, for all places or all time, then it follows that neither the designer nor his client (nor, eventually, the user) can abdicate the responsibility for setting up his own standards. Similarly, there is no escape for the designer from the task of getting his own creative ideas. After all, if the solution to a problem arises automatically and inevitably from the interaction of the data, then the problem is not, by definition, a design problem." [Arc65]

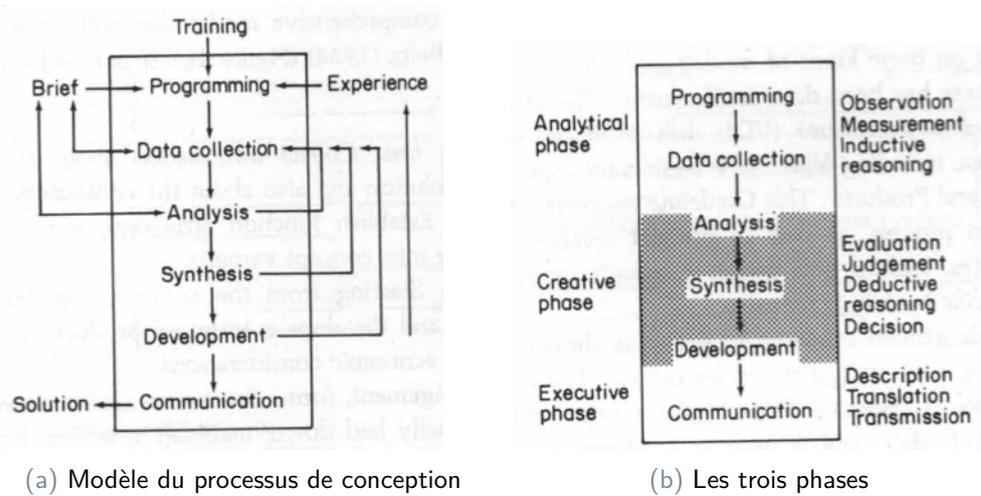


Figure 1.10: Processus de Conception selon Archer (d'après [Cro89])

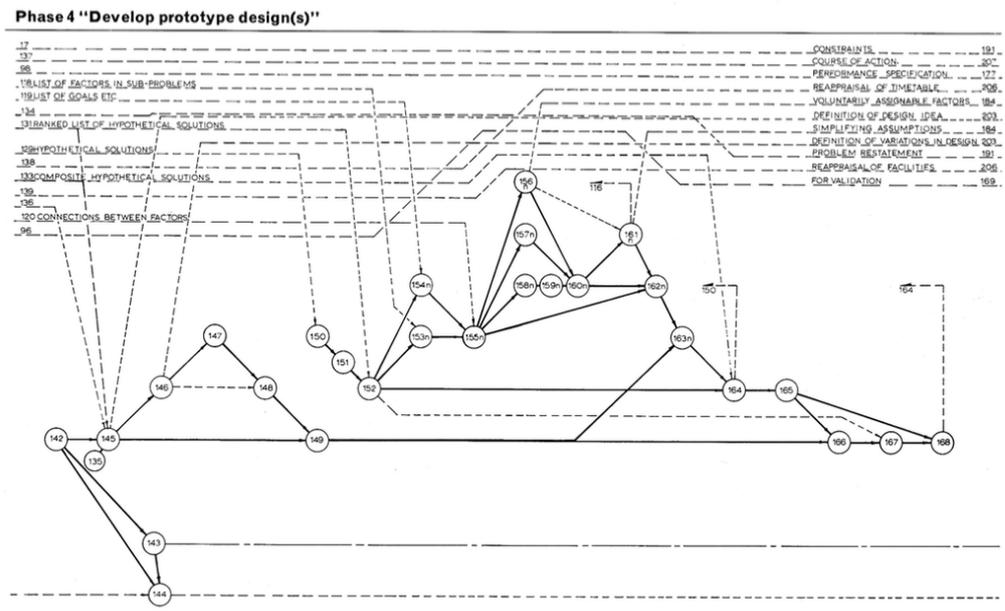


Figure 1.11: Exemple de phase de conception selon Archer : la phase 4, dite de développement de prototype de conception. Il s'agit d'un diagramme de type PERT, avec des événements numérotés. À titre d'exemple, voici quelques-uns des événements de cette planche : 142 – *Commission Received to Execute Phase 4*; 143 – *Acknowledgement Dispatched*; [...] 147 – *List of Available Media Ready*; 148 – *Medium Selected*; 149 – *Key Model Erected*; etc. Les traits en pointillés renvoient vers d'autres événements numérotés d'autre phases : à gauche vers des événements de phases amont, à droite vers des événements de phases aval.

Morris Asimow

Morris Asimow a été un professeur de systèmes techniques à l'Université de Californie. Il a été un des pionniers dans la formalisation de la conception et il a développé ce qui est appelé la morphologie de la conception (*morphology of design*) : "the study of the chronological structure of design projects." [Asi62]. Pour lui elle se traduit par une structure linéaire comportant sept étapes, dont seules les trois premières relèvent vraiment de la conception, les quatre dernières relevant de la planification d'activités soutenant la conception proprement dite :

1. *Feasibility study*;
2. *Preliminary design*;
3. *Detailed design*;
4. *Planning for production*;
5. *Planning for distribution*;
6. *Planning for consumption*;
7. *Planning for retirement*.

Les trois premières sont dites les étapes mêmes de la conception avec les objectifs suivants :

- *Feasibility study* : atteindre un ensemble de solutions utiles au problème de conception posé ;
- *Preliminary design* : sélectionner parmi les solutions offertes laquelle est le meilleur concept ;
- *Detailed design* : fournir une description d'ingénierie d'une solution testée et pouvant être produite.

Il nous invite à une prise de recul sur le processus de conception : “Each design-project has an individual history which is peculiarly its own. Nonetheless, as a project is initiated and developed, a sequence of events unfolds in a chronological order forming a pattern which, by and large, is common to all projects. [...] Design is a progression from the abstract to the concrete. (This gives a vertical structure to a design project.) [...] Design is [also] an iterative problem-solving process. (This gives a horizontal structure to each design step.)” [Asi62]

Sa structure horizontale, appelée processus général de résolution de problèmes (*the general problem solving process*), comprend elle aussi sept étapes :

1. *analysis* ;
2. *synthesis* ;
3. *evaluation* ;
4. *decision* ;
5. *optimisation* ;
6. *revision* ;
7. *implementation*.

John Chris Jones

John Chris Jones est un concepteur gallois, professeur, et membre fondateur de la Design Research Society. Son livre *Design Methods* [Jon70] est considéré comme un texte majeur dans le monde de la conception.

Devant la difficulté de définir ce qu'est la conception (*design*), alors qu'il pose la question à différents professionnels et obtient un florilège de réponses différentes, il avance un double questionnement. D'abord des questions pour le concepteur lui-même, comme par exemple :

“To what extent will it restructure the existing situation to create new demands, opportunities and problems?”.

Ensuite des questions pour la gestion de la conception, comme par exemple :

“Identification and Review of Critical Decisions”.

Dans cet ouvrage, il propose une approche générale de la conception basée sur trois étapes ou phases dans lesquelles se trouve le concepteur : la divergence, la transformation et la convergence.

- Divergence : l'étape pendant laquelle “[...] the act of extending the boundary of a design situation so as to have a large enough, and fruitful enough, search space in which to seek a solution” et le jugement, l'évaluation sont évacués et repoussés.

- Transformation : basé sur les résultats de la divergence, il s'agit de combiner, de transformer, de... afin de faire émerger quelques alternatives viables : "The main objective is to impose, upon the results of a divergent search, a pattern that is precise enough to permit convergence to the single design that must eventually be decided upon and fixed in every detail. The chosen pattern must reflect all the realities of the situation. Pattern-making [...] is the creative act of turning a complicated problem into a simple one by [...] deciding what to emphasize and what to overlook."
- Convergence : étape où il s'agit de réduire les incertitudes (en revenant parfois si nécessaire à l'étape de transformation) jusqu'à ne garder qu'une seule alternative parmi celles élaborées. John Chris Jones note que cette partie est probablement la seule qui puisse être rationalisée, donc automatisée, informatisée.

Pour aider le concepteur, il propose une panoplie (plus d'une trentaine) de techniques pour la conception. Elles sont classées suivant les différentes étapes introduites, suivant leur nature. John Chris Jones en propose la cartographie suivante :

1. *Prefabricated Strategies (Convergence)*;
2. *Strategy Control Methods*;
3. *Methods of Exploring Design Situations (Divergence)*;
4. *Methods for Searching for Ideas (Divergence and Transformation)*;
5. *Methods for Exploring Problem Structure (Transformation)*;
6. *Methods of Evaluation (Convergence)*.

Il donne une grille d'aide à l'utilisation des méthodes suivant les situations de départ, et les situations résultantes escomptées. Nous ne reproduisons ici un extrait (l'intersection des deux premières rangées et colonnes, cet extrait n'ayant qu'un but d'illustration, nous avons reproduit une petite partie du tableau complet afin de garantir sa lisibilité).

sortie → entrée ↓	2 Situation de conception explorée	3 Structure du problème perçue ou transformée
1 Cahier des charge établi	3.1 Définir les objectifs 3.2 Recherche bibliographique 3.3 Incohérence visuelle 3.4 Interviews 4.1 Remue-méninges 4.2 Synectics	3.2 Recherche bibliographique 3.3 Incohérence visuelle 3.4 Interviews 4.1 Remue-méninges 4.2 Synectics
2 Situation de conception explorée		3.1 Définir les objectifs 3.9 données 5.1 Matrice d'interaction 5.2 Réseau d'interaction 5.6 Classification 6.4 (Écriture de) Spécifications

TABLE 1.1: Techniques de conception classées suivant les entrées/sorties selon John Cris Jones [Jon92] (extrait)

Les schématiques Une tradition a été de conceptualiser, formaliser et représenter la démarche de conception au travers d'un schéma d'actions, ou de phases ou d'étapes soit simplement séquentielles, soit entremêlées ou bouclées.

D. Eppinger et Karl T. Ulrich est professeur, vice-doyen à l'innovation de l'université de Pennsylvanie. Steven D. Eppinger est professeur au MIT (Sloan School of Management). Leur livre *Product Design and Development* [EU95, EU12] connaît un franc succès, et est devenu une référence dans l'enseignement de cette discipline. Il en est à ce jour à sa sixième édition. Il est plutôt centré sur des produits de type biens de consommation. Il consacre une large place à la génération, l'évaluation et à la sélection de concepts.

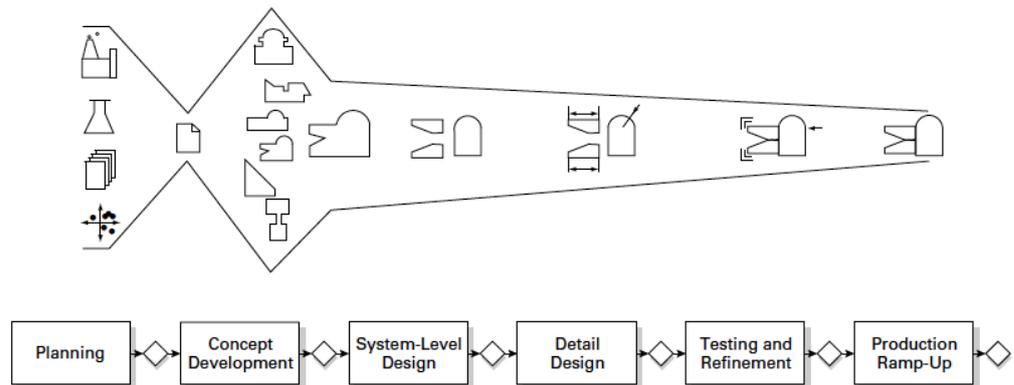


Figure 1.12: Le processus générique de développement de produit d'après Ulrich et Eppinger [EU12]

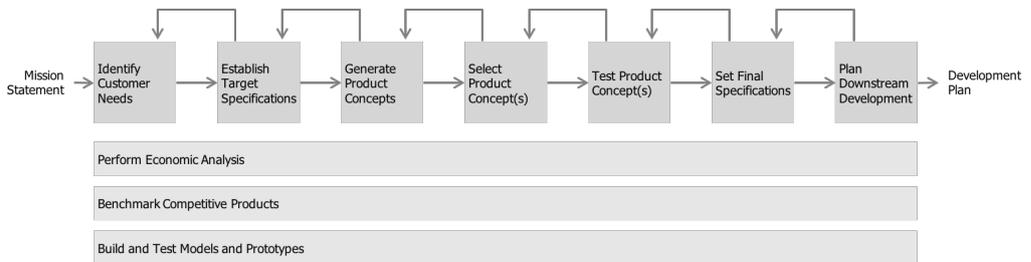


Figure 1.13: L'élaboration du concept d'après Ulrich et Eppinger [EU12]

Michael J. French Michael J. French, professeur de *Engineering Design* à l'Université de Lancaster. Son livre, *Conceptual Design for Engineers* [Fre85], dont la première édition paraît en 1971, pose un certain nombre de définitions et de concepts que nous reproduisons ici.

La conception (*design*) doit être comprise comme "all the process of conception, invention, visualisation, calculation, marshalling, refinement, and specifying of details which determines the form of an engineering product." [Fre85] Il insiste particulièrement sur les phases amont, pendant lesquelles il y a d'importantes décisions à prendre et introduit le concept de schème, comme étant une ébauche, un aperçu de la solution ("[...] early stages, when there are still major decisions to be made, are called 'conceptual design'. The products of the conceptual design stages will be called 'schemes'. By a scheme is meant an outline solution to a design problem [...] " [Fre85])

Il propose de traduire l'anatomie de la conception (*anatomy of design*) en le diagramme bloc suivant.

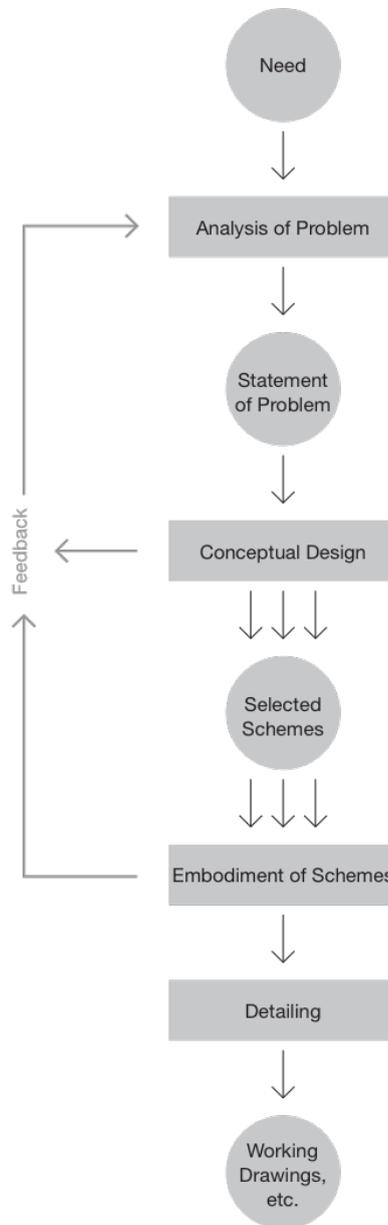


Figure 1.14: Le processus de conception technique d'après French [Fre85]

Il détaille les étapes majeures de la manière suivante.

L'analyse du problème : "The analysis of the problem is a small but important part of the overall process. The output is a statement of the problem, and this can have three elements:

- a statement of the design problem proper
- limitations placed up the solution, e.g. codes of practice, statutory requirements, customers' standards, date of completions
- the criterion of excellence to be worked to. " [Fre85]

La conceptualisation : “It takes the statement of the problem and generates broad solutions to it in the form of schemes. It is the phase that makes the greatest demands on the designer, and where there is the most scope for striking improvements. It is the phase where engineering science, practical knowledge, production methods, and commercial aspects need to be brought together, and where the most important decisions are taken. ” [Fre85]

La convergence des schèmes : “[...] schemes are worked up in greater detail, and if there is more than one, a final choice between them is made. The end product is usually a set of general arrangement drawings. There is (or should be) a great deal of feedback from this phase to the conceptual design phase [...] ” [Fre85]

La conception détaillée : “[...] a very large number of small but essential points remain to be decided. ” [Fre85]

Gerahrd Pahl et
Wolfgang Beitz

L'approche systématique (*Systematic Approach*) de Pahl et Beitz se condense en une séquence de quatre grandes phases :

1. la clarification (*Task Clarification*), qui rassemble et documente les exigences du produit à concevoir ;
2. la conception exploratoire (*Conceptual design*), qui vise à identifier les principes fondamentaux et l'ébauche de la solution ;
3. la conception générale (*Embodiment design*), qui élabore la solution en terme d'agencement, de structure des éléments ;
4. la conception détaillée (*Detail design*), qui finalise la conception pour être prête pour passage en production.

Chaque phase met en œuvre des activités qui peuvent être exécutées itérativement. Chaque phase est censée se conclure par une revue jalon, qui permet de décider si la phase suivante peut être enclenchée, ou si la courante doit être réitérée (cf. figure 1.16 page suivante).

Ce processus est mis en œuvre suivant une démarche basée sur les mécanismes de décomposition et recombinaison.

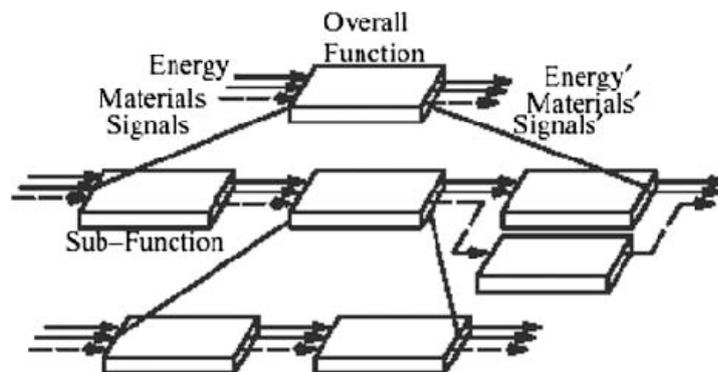


Figure 1.15: Décomposition / recombinaison d'après Pahl et Beitz [PBW84]

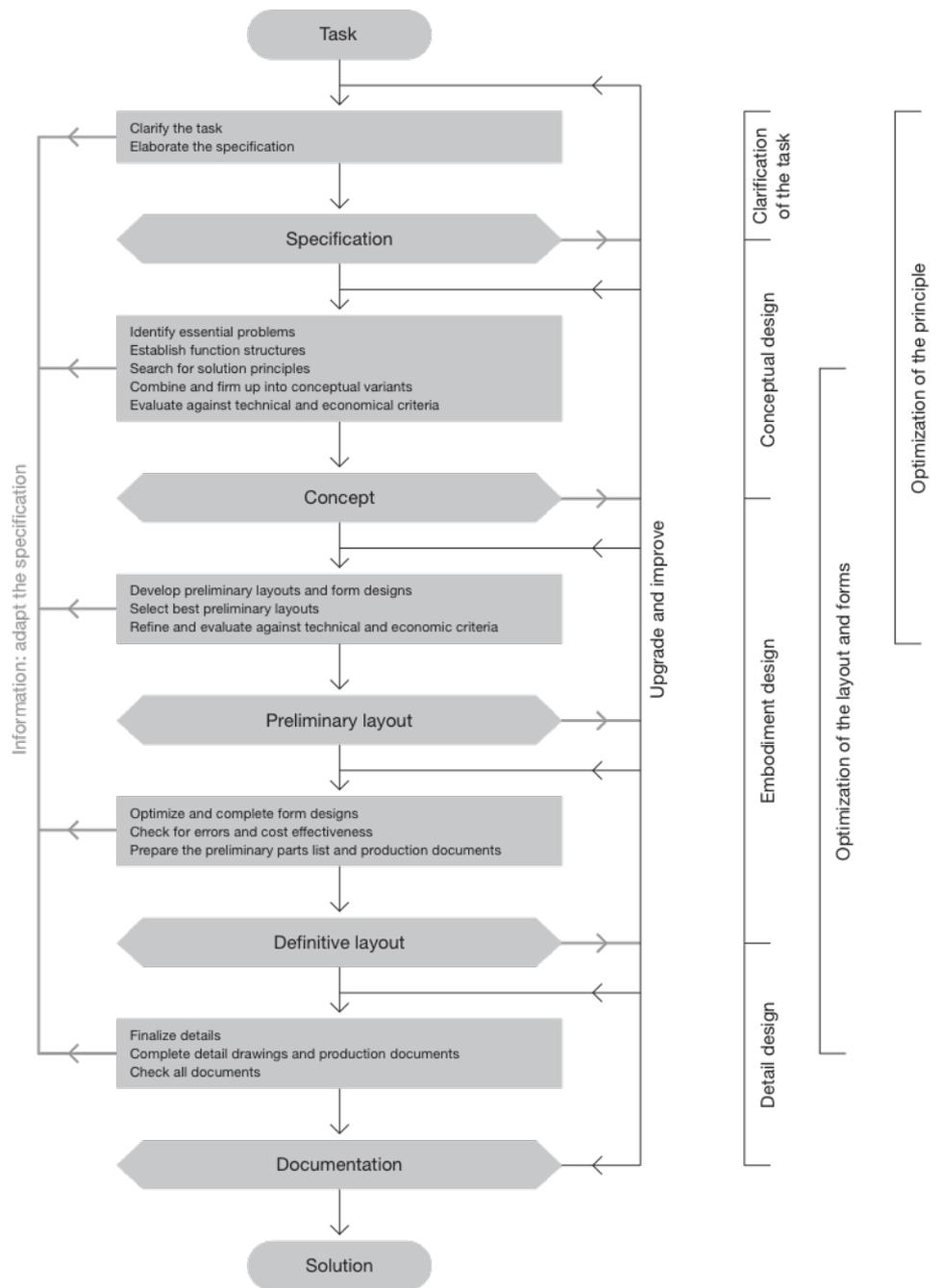


Figure 1.16: Le processus de conception d'après Pahl et Beitz [PBW84]

VDI

VDI est l'acronyme de *Verein Deutscher Ingenieure*, la société d'ingénierie allemande. Son guide VDI 2221 (*Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*) propose une démarche de conception en étapes et basée sur le mécanisme de décomposition/recomposition.

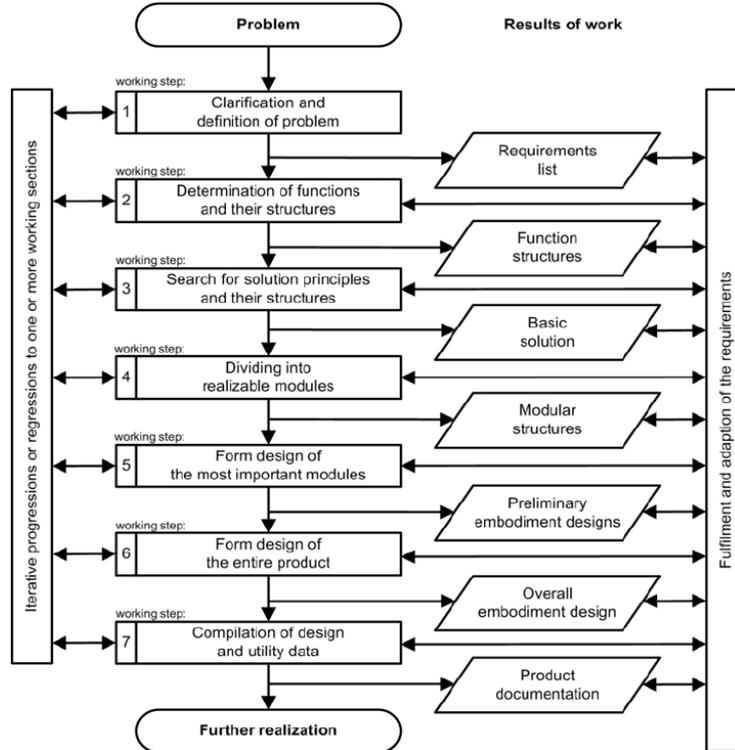


Figure 1.17: Approche système pour la conception de produits et systèmes techniques d'après VDI 2221

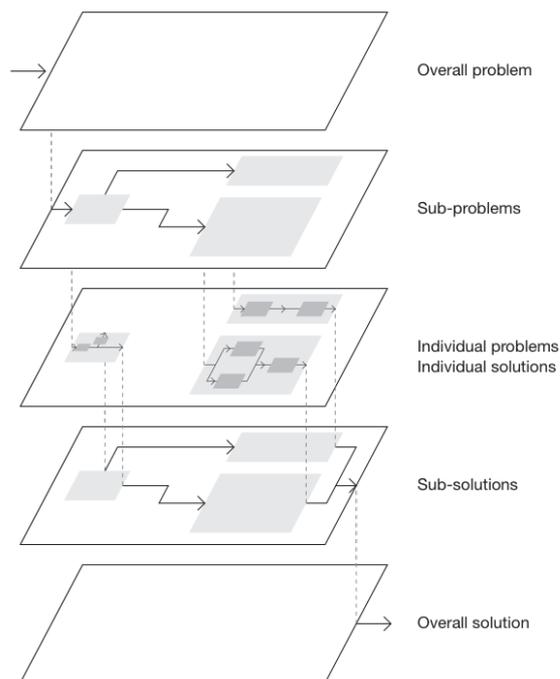


Figure 1.18: Décomposition / recomposition d'après VDI 2221

Les métaphoriques

Certains ont exposé des démarches de conception, non pas dans une vision séquentielle ou décomposée en étapes précises, éventuellement bouclées, mais en s'inspirant de certaines métaphores pour abstraire et décrire le processus ou la démarche de conception.

Le gribouillis (*Design Squiggle*) de Damien Newman

Damien Newman a fait ce *gribouillis* pour expliquer et illustrer ce qu'il avait lui-même appris de la conception : Elle démarre avec de l'abstrait, et de l'incertain, se dirige et cherche le concept pour enfin aboutir à la conception proprement dite. Ce démarrage dans le flou et l'incertain, qui pourrait presque avoir des allures chaotiques, se retrouve dans la littérature anglo-saxonne sous la dénomination de *fuzzy front end*. Alors qu'au début le concepteur n'a même pas forcément idée de la forme que prendra sa solution (un produit ?, un service ?, une interface ? ...), cette exploration amont devra lui permettre de déterminer et de partitionner entre ce qui peut être conçu et ce qui ne peut pas l'être.

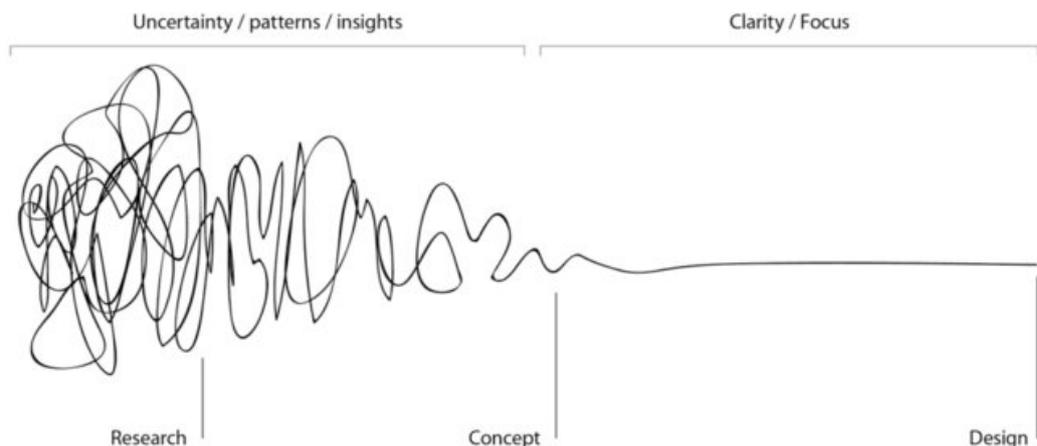


Figure 1.19: Le gribouillis de D. Newman [New18]

Bela Banathy

Bela Banathy place la conception comme étant une démarche qui s'inscrit dans cinq espaces [Ban96].

- Exploration et Projection d'images (*Exploration and Image Creation Space*) : résultat de l'activité de d'investigation (*inquiry*), nous y trouvons les options, alternatives, idées qui vont permettre d'élaborer l'image du futur système.
- Information et Connaissances (*Design Information and Knowledge Space*) : réceptacle de l'information collectée et de la connaissance accumulée (y compris les modèles et les outils), nécessaires pour élaborer et tester de nouvelles solutions.
- Solution (*Design Solution Space*) : *grosso modo*, un espace pour spécifier et décrire la solution dans son environnement.
- Évaluation et Expérimentation (*Evaluation and Experimentation Space*) : un espace pour tester et évaluer les alternatives imaginées selon les critères spécifiés dans l'espace de la solution.
- Modélisation (*Modeling Space*) : il contient le modèle du système et de son environnement.

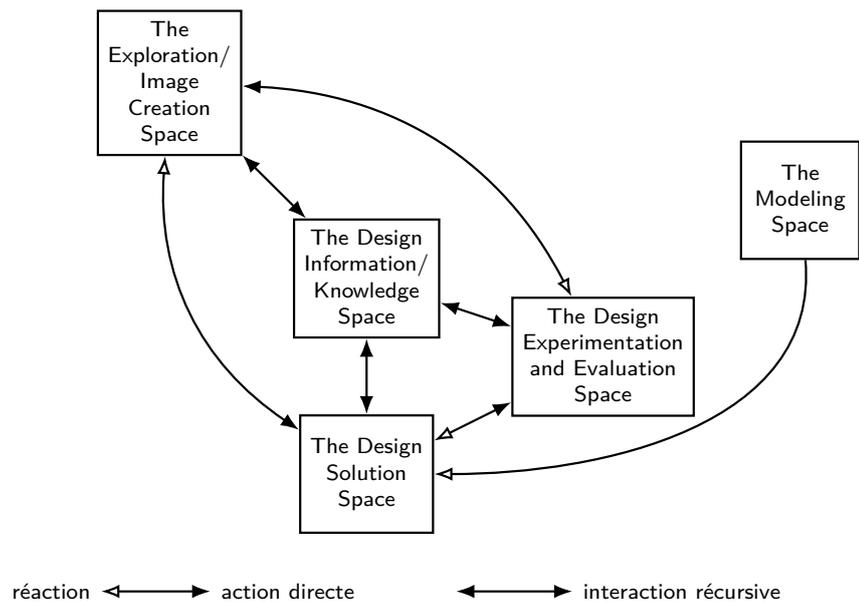


Figure 1.20: Les espaces de la conception et leurs organisations selon B. Banathy [Ban96]

Il distingue deux types de dynamique de conception (*design dynamics*) :

- l'une, en spirale, qui consiste à cheminer itérativement d'un espace à l'autre. Ce chemin est indiqué sur la figure 1.20 ;
- l'autre qui consiste à enchaîner phases de divergence et de convergence, comme indiqué sur la figure 1.21

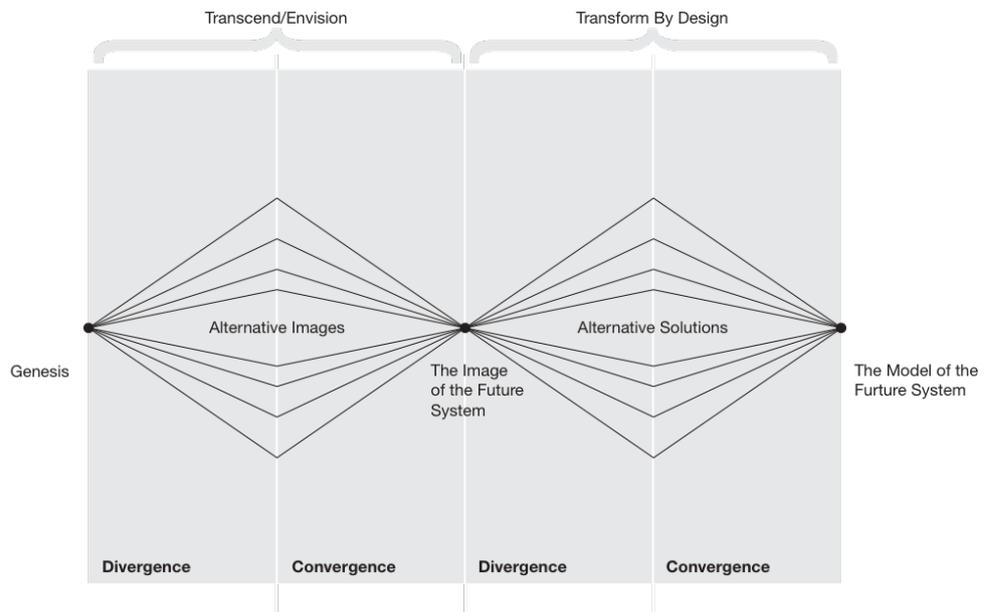


Figure 1.21: Divergences et Convergences selon B. Banathy [Ban96]

Nigel Cross

Dans son livre *Engineering Design Methods* [Cro89], Nigel Cross balaye un certain nombre de méthodes également évoquées ici. Il introduira une notion intéressante, celle de stratégies de conception (*Design Strategies*). Appliquer telle ou telle méthode à des instants précis de la démarche de conception se doit de procéder d'une pensée stratégique, formulée en une stratégie de conception : "A design strategy describes the general plan of action for a design project and the sequence of particular activities (i.e. the tactics or design methods) which the designer or design team expects to take to carry through the plan. To have a strategy is to be aware of where you are going and how you intend to go there." [Cro89] La palette des stratégies peut être vaste, et à un extrême, ne pas avoir de stratégie peut en être une qui consiste à explorer de manière aléatoire (*random search*). A l'autre extrémité se trouverait une stratégie entièrement préfabriquée qui paverait le chemin du concepteur. Elle est applicable quand il s'agit de concevoir lors d'une situation bien connue et bien maîtrisée. Entre ces deux extrêmes vient prendre place une palette de stratégies qui emprunte à chacun de ces styles extrêmes (cf. figure 1.22). En fait chacune des deux démarches procèdent de deux modes de pensées différents et complémentaires, telle que remarqués par les psychologues. Nigel Cross en fait la synthèse suivante.

Mode de Pensée. . .	
Convergent	Divergent
Évalue, sélectionne, va dans le détail	Conceptualise, génère de nouvelles alternatives
Séquentiel	Holistique
Pense les choses les unes après les autres	Pense les choses dans leur ensemble
Linéaire	Latérale
Se dirige en ligne droite vers le but perçu	Fait à l'occasion des détours

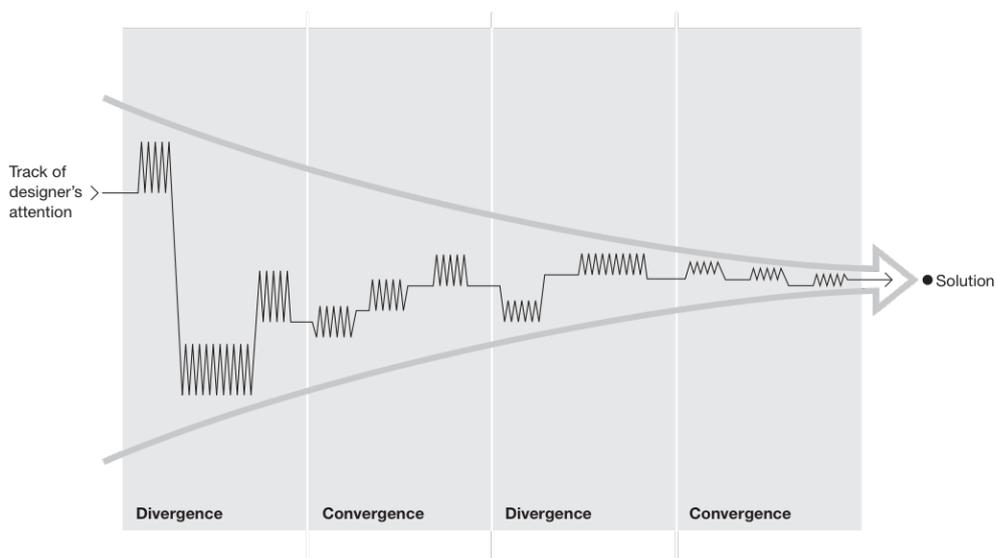


Figure 1.22: Convergence globale selon Cross [Cro89]. L'enveloppe globale de la démarche reste convergente –trait gras grisé –, alors que le travail du concepteur – trait fin noir – oscille, fait des bonds et passe par des phases de divergence puis de convergence.

Le double diamant
(*Double Diamond*)
du Design Council

Cette représentation en double diamant a été développée et publiée par le Design Council du Royaume Uni en 2005 [Cou07]. Il décrit la démarche de conception comme une succession d'étapes divergentes (*divergent thinking*, qui étend le champ des possibles) et convergentes (*convergent thinking* qui restreint le champ des possibles).

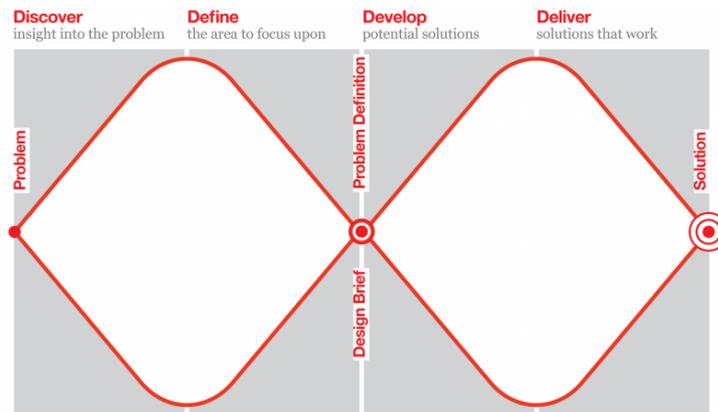


Figure 1.23: Le double diamant du Design Council

- Découvrir (*Discover*). À partir du besoin initial, diverses actions de découvertes peuvent être lancées : interviews, *user stories*, recherche d'information *tout azimuth* . . .
- Définir (*Define*). La collection d'informations découvertes donne lieu maintenant à une organisation précise qui permet de recadrer et d'établir un cahier des charges clair et concis.
- Développer (*Develop*). Des prototypes ou maquettes sont élaborés, testés, ouvrant à autant de nouvelles idées, de nouvelles découvertes. . .
- Délivrer (*Deliver*). De nouveau, convergence vers l'alternative jugée la *meilleure*. Des plans sont établis afin de permettre la production du produit visé.

Le flipper (*pinball*)
de Moggridge
(IDEO)

Ce visuel a été créé par Bill Moggridge, un des fondateurs d'IDEO, célèbre cabinet de consultants en design. Pour lui : "The [design] process is iterative rather than linear and does not necessarily follow a sequence. The most productive approach is often apparently unstructured. . . The process does not look like a linear system diagram, nor even a revolving wheel of iterations, but is more like playing with a pinball machine, where one bounces rapidly in unexpected directions".

- Contraintes (*Constraints*) : Comprendre et absorber le contexte de l'opportunité.
- Synthèse (*Synthesis*) : Synthétiser l'information brute absorbée.
- Cadrage (*Framing*) : Cristalliser en une forme claire.
- Idéation (*Ideation*) : Produire des idées.
- Représentation (*Envisioning*) : Exprimer dans une forme de représentation concrète, se confronter au réel.
- Incertitude (*Uncertainty*) : Embrasser l'incertitude.
- Sélection (*Selection*) : Sélectionner les idées que l'on conserve, celles que l'on élimine.
- Visualisation (*Visualization*) : Communiquer au travers de médias convaincants et réalistes.

- Prototypage (*Prototyping*) : Produire des artefacts qui permettent de tester un aspect particulier de la conception.
- Évaluation (*Evaluation*) : Observer et juger du succès d'un prototype, d'une visualisation ou d'une représentation.

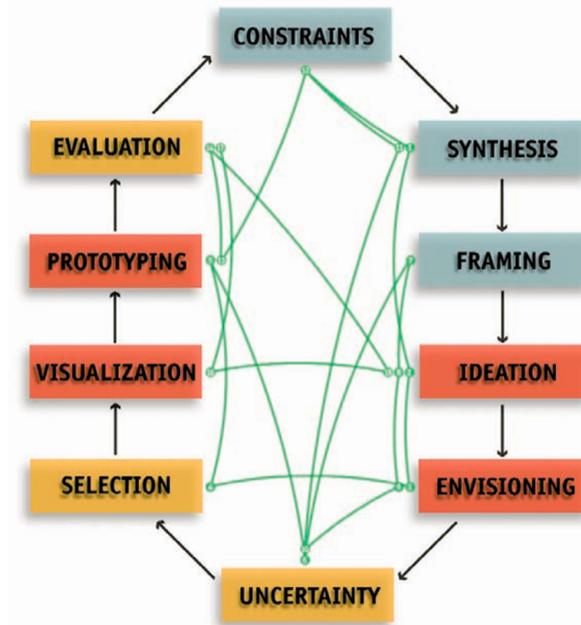


Figure 1.24: Le flipper d'après Moggridge [MA07]

L'hélice (*helix*) de
Mihajlo D.
Mesarovic

Mihajlo D. Mesarovic, connu également pour ses travaux en théorie des systèmes, fut certainement un des premiers à poser une représentation du processus de conception. Son modèle en forme d'hélice date de 1964. Elle cherche à combiner les avancées de l'ingénierie et de la systémique. Elle est basée sur :

- une structure élémentaire du processus qui enchaîne analyse, synthèse, évaluation et communication ;
- globalement un passage de l'abstrait vers le concret impliquant six étapes (définition du besoin, étude de faisabilité, conception préliminaire, conception détaillée, planification de la production, production) ;
- l'imbrication de la structure élémentaire répétée (itérée) temporellement le long des étapes.

Ce qui se traduit par cette représentation en spirale, une représentation en 3D, rajoutant le temps comme axe vertical de ce que sera plus tard le fameux cycle en spirale de Barry Boehm [Boe88].

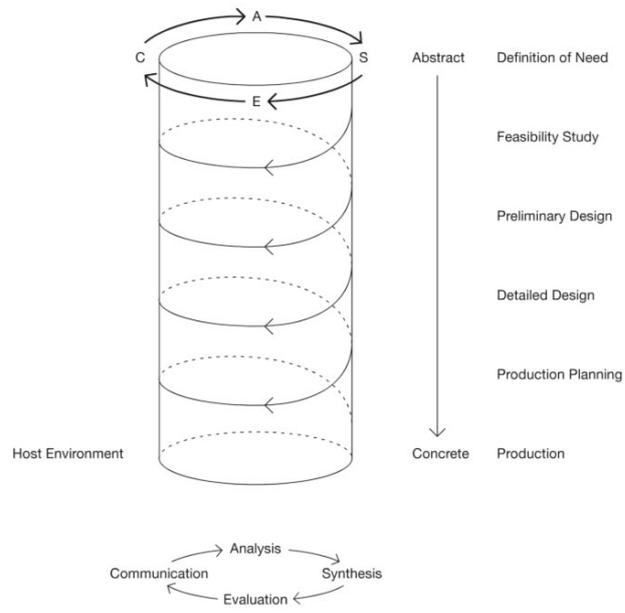


Figure 1.25: L'hélice de Mesarovic schématisé par Dubberly [Dub04]

Stuart Pugh

Stuart Pugh, après avoir été un ingénieur concepteur dans le monde industriel, se consacra à une carrière académique. Tout d'abord, à partir des années 70, à la *Loughborough University of Technology*. Puis, en 1985, il part vivre en Écosse et entre à la *University of Strathclyde* de Glasgow où il dirigea le département de Design.

Il publie en 1990 *Total Design : Integrated Methods for Successful Product Engineering* [Pug91] dans lequel il expose une démarche de conception systématique, dans laquelle il défend et met en avant le caractère participatif et transdisciplinaire de la conception. "Total Design is the systematic activity necessary, from the identification of the market/user need, to the selling of the successful product to satisfy that need – an activity that encompasses product, process, people and organization." [Pug91]

Son modèle d'activité du *Total Design (Total Design Activity Model)* comprend plusieurs volets (ou couches) (cf. figure 1.26 page suivante) :

- le cœur (*design core*) qui se décline en six phases qui s'enchaînent formant ainsi un flot principal faisant l'objet d'itérations opportunes. Ces phases sont : les besoins (*market (user need)*), la spécification (*product specification*), la conception générale (*conceptual design*), la conception détaillée (*detailed design*), la production (*manufacturing*) et la vente (*sales*) ;
- la spécification de la conception du produit (*Product Design Specification (PDS)*) est un container (un document) dynamique qui évolue depuis la première phase jusqu'à la dernière, et comprend les éléments nécessaires pour l'exécution de ces phases. Il vient *envelopper* le cœur, lui servant d'élément de spécification et de contrôle ;
- les entrées qui alimentent le cœur et proviennent des disciplines contributrices.

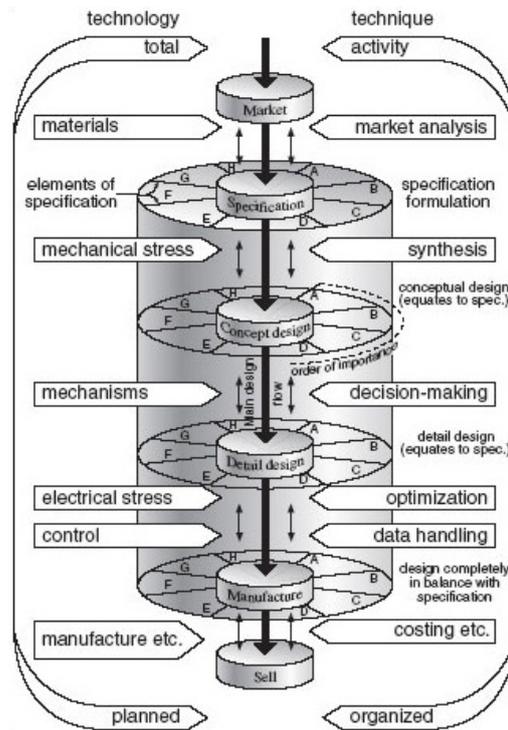


Figure 1.26: Le *Total Design* de Pugh

Pugh est également connu pour sa méthode de sélection de concept, connu sous le nom de PuCC (*Pugh Controlled Convergence*). Plutôt que de raisonner à *plat* et de faire une sélection *unique* (d'un seul ensemble d'alternatives) à l'aide d'une matrice, Pugh suggère de tirer parti de successions de phases de divergence et de convergence (cf. figure 1.27). Cela permet d'avoir l'opportunité à la fois d'éliminer des concepts jugés inappropriés, comme d'en insérer de nouveaux. Un point saillant dans la démarche réside dans la manière de comparer et présenter les alternatives au travers d'une matrice particulière, dite matrice de Pugh (*Pugh's matrix*), basée sur des comparaisons deux à deux.

Cette démarche vise à converger vers un concept solide et prometteur tout en ayant une compréhension des raisons de ce choix (« *Pourquoi en-est-on arrivé là* »).

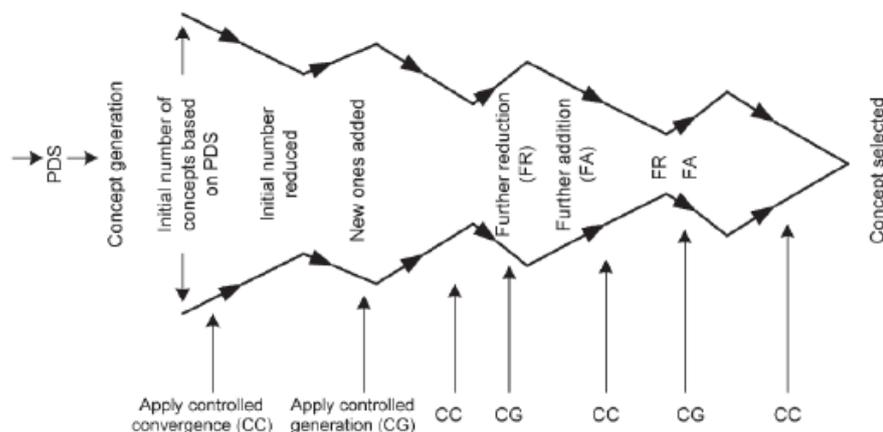


Figure 1.27: La convergence contrôlée de Pugh (*Pugh's Controlled Convergence*)

Les théoriciens

Nous complétons notre parcours de deux théories de la conception qui mettent en avant des aspects particulièrement remarquables et qui nous inspireront dans la suite de notre recherche. La première, pour son idée de zigzag, la seconde pour son concept d'expansion.

Axiomatic Design

La théorie d'*Axiomatic Design* [Suh90, Suh01, Suh05] de Nam Pyo Suh se fonde sur un certain nombre de concepts clés.

D'après Suh, la conception, comme passage entre le quoi (*what*) et le comment (*how*) implique un certain nombre d'activités. Pour systématiser le processus de passage, la notion de *domaine* est introduite pour dénoter la ligne de démarcation entre les différentes activités de conception. Quatre domaines définissent le monde de la conception.

- Le domaine client (*customer domain*), caractérisé par les attributs de clients (*Customer Attributes*), notés $\{CA\}$, en clair les besoins.
- Le domaine fonctionnel (*functional domain*), caractérisé par les exigences fonctionnelles (*Functional Requirements*), notées $\{FR\}$, la transformation des besoins en leur contrepartie dans le monde de l'ingénierie, soit le « *que voulons-nous chercher à atteindre, à réaliser, à fournir ?* »
- Le domaine physique (*physical domain*), caractérisé par les paramètres de conception (*Design Parameters*), notés $\{DP\}$, qui définissent la manière dont les exigences fonctionnelles vont être satisfaites, soit le « *comment comptons-nous atteindre le résultat, sur quoi pouvons-nous jouer ?* »
- Le domaine du processus (*process domain*), caractérisé par les variables de production (*Production Variables*), notées $\{PV\}$, qui définissent le « *comment allons-nous produire la solution ?* »

Le passage d'un domaine à l'autre se fait par traduction, transfert (*mapping*).

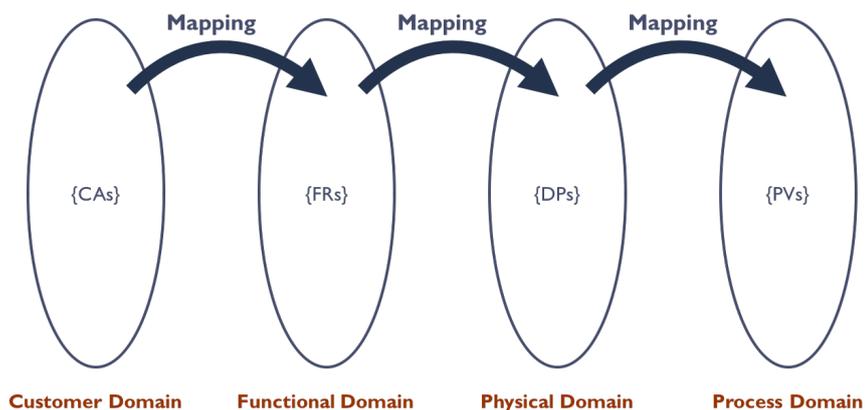


Figure 1.28: Le terrain de jeu de la conception selon Suh dans *Axiomatic Design*

L'autre aspect remarquable de la théorie de Suh est de postuler qu'il existe des axiomes qui gouvernent le processus de conception. Par l'étude de ce qui caractérise de *bonnes* conceptions, il énonce les deux axiomes suivants :

Axiome 1

Axiome d'indépendance

Maintenir l'indépendance des exigences fonctionnelles ($\{FR\}$)

Axiome 2

Axiome d'information

Minimiser le contenu informationnel de la conception

Le premier axiome permet de diriger la conception, le second intervient après coup pour départager des solutions équivalentes en termes d'indépendance. Ils appellent à un éclaircissement.

Tout d'abord l'axiome d'indépendance indique que pour deux exigences fonctionnelles différentes il faudrait que les paramètres de conception qui permettent de les atteindre soient répartis en deux sous-ensembles distincts, ou dépendant le moins l'un de l'autre. Le passage d'un domaine à l'autre peut se formaliser mathématiquement : un vecteur des caractéristiques sources, un vecteur des caractéristiques cibles et une matrice de passage. En particulier le passage des $\{FRs\}$ (le quoi) vers les $\{DPs\}$ (le comment).

$$\{FR\} = [A] \cdot \{DP\} \quad (1.1)$$

où $[A]$ s'appelle la matrice de conception (*design matrix*). Par exemple, dans le cas de trois exigences fonctionnelles et trois paramètres de conception, l'équation 1.1 s'écrit

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (1.2)$$

L'équation 1.1 peut aussi se décliner dans une forme différentielle

$$\{dFR\} = [A] \cdot \{dDP\} \quad (1.3)$$

avec

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j}$$

Dans le cas précédent (3 FR et 3 DP) et suivant la forme de la matrice, nous pouvons définir des typologies de conception.

- $\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix}$ matrice diagonale qui traduit une conception non couplée.

Un paramètre de conception (et un seul) contrôle la réalisation d'une exigence fonctionnelle (et d'une seule).

- $\begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$ matrice triangulaire, qui traduit une conception découplée.

Nous pouvons trouver une séquence d'ajustement des paramètres de conception qui aboutit à atteindre les *bonnes* exigences fonctionnelles, et donc maintenir leur indépendance.

- $\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix}$ matrice quelconque qui ne permet pas de garantir l'indépendance des exigences fonctionnelles.

De manière générale, nous pouvons tirer les conséquences des cas suivants (qui découlent en autant de théorèmes) :

- le nombre de DPs est inférieur au nombre de FRs : Il en résulte une conception forcément couplée ;
- le nombre de DPs est supérieur au nombre de FRs : Il en résulte une conception soit redondante (découplée ou non couplée), soit couplée ;
- le nombre de DPs est égal au nombre de FRs : Nous pouvons avoir tous les cas, et il peut exister un cas dit idéal où la conception est non couplée, l'axiome d'indépendance parfaitement vérifié, et où un paramètre de conception contrôle une et une seule exigence fonctionnelle. Si c'est le cas, nous sommes alors dans une conception dite *idéale*.

Mais un des points particulièrement marquants de la théorie de Suh est la manière de décomposer conjointement les FRs et DPs. De manière à conserver une cohérence et une équivalence entre les deux domaines (et donc de rester dans le cadre d'une conception idéale), Suh conseille de zigzaguer entre les deux domaines, de manière à maintenir un niveau de décomposition équivalent (cf. figure 1.29). Ceci représente une manière de pivoter par rapport aux démarches classiques qui sont soit *top-down* (les FRs sont décomposés, puis après les DPs), soit *bottom-up* (les DPs sont décomposés, puis on remonte à la décomposition des FRs).

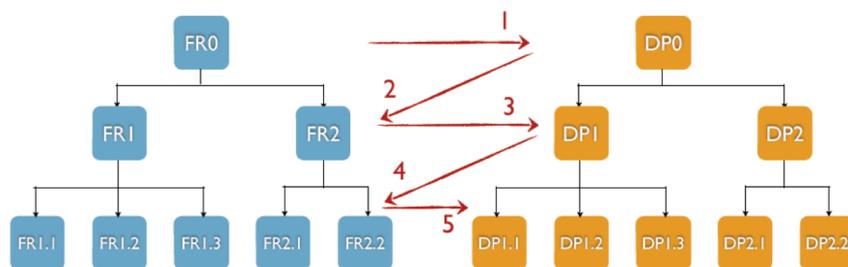


Figure 1.29: Le zigzag de Suh dans *Axiomatic Design*

Le second axiome emprunte à la théorie de l'information de Claude Shannon. Nous n'allons pas l'exposer dans sa forme mathématique, si ce n'est rappeler que le contenu informationnel I_i d'une exigence fonctionnel FR_i est défini, par analogie avec la théorie de Shannon¹⁰, relativement à la probabilité P_i de satisfaire FR_i :

$$I_i = -\log P_i \quad (1.4)$$

De manière intuitive, disons que l'information d'une conception est une mesure de ce qu'il faudrait ajouter (contenu informationnel) comme mesure compensatoire pour pallier une conception qui ne satisferait pas entièrement les exigences fonctionnelles telles que spécifiées.

10. Trivialement parlant, l'information est une mesure de l'incertitude.

C-K

La théorie C-K [HW02] de la conception est construite autour d'un concept central, le concept d'*expansion*. Une situation de conception se caractérise par le fait que le concepteur appliquant son talent, ses connaissances, son raisonnement « *accroît* » son horizon que cela soit de manière rationnelle ou raisonnée, ou par un mécanisme de découverte ou de créativité. Cette notion dite d'expansion est censée subsumer l'exploration (parcours dans un univers existant) et l'imagination (génération *spontanée* de nouveaux possibles), voire aller au-delà. Partant d'un ensemble de départ qui pourrait être celui des solutions envisageables, ou celui de notre connaissance d'un sujet donné, le concepteur effectue des partitions de cet ensemble initial. Certaines partitions sont dites *restrictives* (elles ne remettent pas en cause la spécification de l'ensemble de départ), d'autres *expansives* (procéder à une partition amène à remettre en cause la spécification même de l'ensemble. Cela devrait aboutir à *mieux* le comprendre et à potentiellement l'*élargir*). Une démarche de conception se doit donc de comporter des partitions expansives successives afin d'être féconde à l'apparition d'inventions.

Dans la démarche de conception, le mécanisme de partitions expansives repose sur la reconnaissance de deux espaces C et K « [...] *proposition fondamentale : tout raisonnement de conception suppose la distinction entre deux espaces associés : l'espace des concepts et l'espace des connaissances.* » [HW02] :

- C : l'espace dit des *concepts* : l'ensemble des propositions ou des notions à partitionner n'étant pas entièrement spécifié, il est par nature expansible. Ces propositions n'ont a priori pas de statut logique particulier (vérité, probabilité...).
- K : l'espace dit des *connaissances* : cette partition s'opère en référence à une connaissance extérieure, elle-même en expansion.

Ces deux espaces sont sous-tendus par deux théories mathématiques : l'espace C des concepts s'appuie sur la théorie des ensembles (et plus particulièrement celle de Zermelo-Fraenkel en excluant l'axiome de choix), l'espace K des connaissances s'appuie sur la catégorie *CAT* à savoir la catégorie des ensembles en théorie des catégories.

La démarche de conception se traduit par une co-évolution de ces espaces au travers de quatre types d'opérateurs : $C \rightarrow C$, $C \rightarrow K$, $K \rightarrow C$, $K \rightarrow K$

disjonction K-C, $K \rightarrow C$ Partant de connaissances préalables, une nouvelle idée (concept) est formulée, sans statut logique particulier. Par exemple, nous pouvons introduire l'idée d'une « *clé facilement localisable* ». Nous savons ce qu'est une *clé* (pas besoin de la concevoir), mais nous ne savons pas forcément comment répondre à *facilement localisable*. Nous avons donc puisé dans notre réservoir de connaissance pour donner naissance à un nouveau concept.

conjonction C-K, $C \rightarrow K$ Dès lors que nous atteignons une étape où nous jugeons un concept *suffisamment* élaboré, il peut acquérir le statut de connaissance. En reprenant l'exemple précédent, si nous considérons que la proposition « *une clé facilement localisable possède la propriété P1* » est vraie, alors cette proposition peut être versée à l'espace des connaissances.

expansion C-C, $C \rightarrow C$ De nouvelles partitions (expansives) ajoutent des propriétés aux concepts et en créent de nouveaux.

expansion K-K, $K \rightarrow K$ Le rapatriement de l'exploration de concepts en connaissances (conjonction C-K) permet de procéder à des expansions de la connaissance.

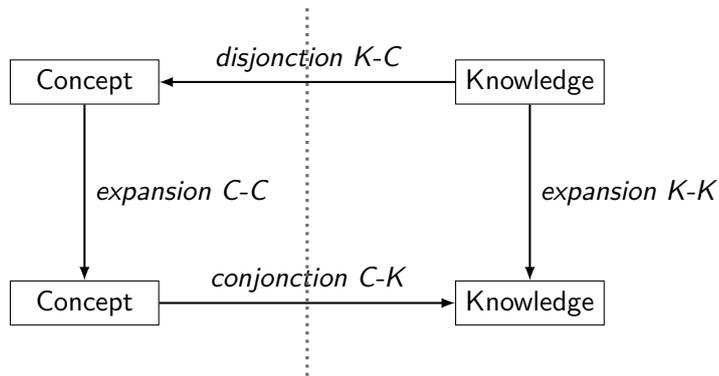


Figure 1.30: Espaces C-K et opérateurs

Cette théorie vise à donner un cadre général dans lequel les autres théories deviennent des *restrictions* et qui prétend pouvoir expliquer et rendre compte toute forme de créativité.

1.3.3 Synthèse

De ce parcours, et en guise d'introduction à la conception architecturale des systèmes artificiels complexes, nous tirons la synthèse suivante de ce qu'est *la conception*. Elle se cristallise en la reconnaissance d'un postulat fondateur, le caractère non unique, non réductible et certainement non prédéterminé, bref quelque part non complètement mécanisable de la conception architecturale. En revanche, nous nous sommes forgé la conviction qu'elle procédait d'un certain nombre de principes, oserions-nous dire d'archétypes. Nous restons volontairement dans cette vision paradigmatique et nous nous refusons d'établir ici une théorie, ou une méthodologie, ou encore moins une science de la conception.

Postulat primordial



Point important 1.2 [La conception n'emprunte pas un chemin unique et prédéterminé]

La conception doit se voir avant tout avec une vision boîte noire. Tenter d'en donner une vision boîte de verre précise et explicite reviendrait à la réduire. Au contraire, chaque conception d'une opportunité donnée doit se voir comme une aventure à part entière, sans cesse renouvelée, mais qui obéit (qui peut ou qui devrait obéir) à certains principes.

Cette idée est magnifiquement illustrée par le poème d'Antonio Machado, utilisé comme épigraphe des notes de lecture d'une conférence donnée par Jean-Louis Le Moigne ([LM10]).

Marcheur, ce sont tes traces
 Ce chemin, et rien de plus ;
 Marcheur, il n'y a pas de chemin,
 Le chemin se construit en marchant.
 En marchant se construit le chemin,
 Et en regardant en arrière on voit la sente que jamais
 On ne foulera à nouveau.
 Marcheur, il n'y a pas de chemin,
 Seulement des sillages sur la mer.

Poème original en espagnol d'Antonio Machado *Chant XXXIX Proverbios y cantares, Campos de Castilla, 1917*, traduction de José Paretès-Llorca.

Principes fondamentaux



Point important 1.3

[La conception est un processus *Set-Based*]

La conception ne se focalise pas uniquement sur une solution, mais sur un ensemble de solutions possibles. Travaillant de front sur un ensemble, et non une proposition à la fois, elle sera dite *Set-Based*.

Non seulement la conception se doit de considérer un ensemble de solution, mais elle doit reconnaître l'absence d'une solution optimale, plutôt *des* compromis comme le pose Lawson : “[there are] no optimal solutions to design problems but rather a whole range of acceptable solutions (if only the designers can think of them), each likely to prove more or less satisfactory in different ways and to different clients or users” [Law14]



Point important 1.4

[La conception est un processus globalement convergent]

La constitution, voire l'élargissement ainsi que l'exploration de cet ensemble de possibles ne peut rendre le processus divergent ou chaotique trop longuement. Il se doit de converger en visant une solution. Cette convergence se doit d'associer (co-conception) les parties prenantes. La solution qui sera retenue in fine se devant d'être satisfaisante au regard d'un certain nombre de parties prenantes, ce processus de convergence doit les soutenir et les guider vers une prise de décision commune de la *bonne* orientation de la solution.



Point important 1.5

[La conception enchaîne divergences et convergences locales]

La convergence n'est pas forcément monotone. Si c'était le cas, cela voudrait dire que nous serions en mesure de disposer d'un ensemble large et complet de possibles dès le départ, et que nous le réduirions successivement pour converger vers une *bonne* solution. Cette supposée

complétude initiale vient en contradiction avec le nécessaire travail de perception et connaissance de l'opportunité. Celui-ci se poursuit tout du long. La manifestation dans le processus de convergence globale est qu'il est rythmé par des périodes de divergence locale (augmentation de l'ensemble des possibles) et d'autres de convergence (réduction de l'ensemble des possibles).



Point important 1.6

[La conception est un processus itératif]

Ces périodes et ces enchaînements de convergence/divergence se répétant pour aboutir à une convergence globale, le processus de conception est donc itératif (comme d'ailleurs la plupart des processus de création).



Point important 1.7

[La conception est un processus zigzagant]

Sérialiser la perception et l'élaboration d'une solution, c.-à-d. attendre d'avoir atteint un état de complétude, même partiel, sur la connaissance de l'opportunité pour enchaîner l'élaboration d'une solution n'est pas très efficace. Les deux doivent se construire de manière concurrente en se renvoyant mutuellement la balle : mieux percevoir l'opportunité aidera à élaborer un ensemble de propositions, et réciproquement explorer des futurs possibles aidera à regarder l'opportunité sous des angles différents ou complémentaires.

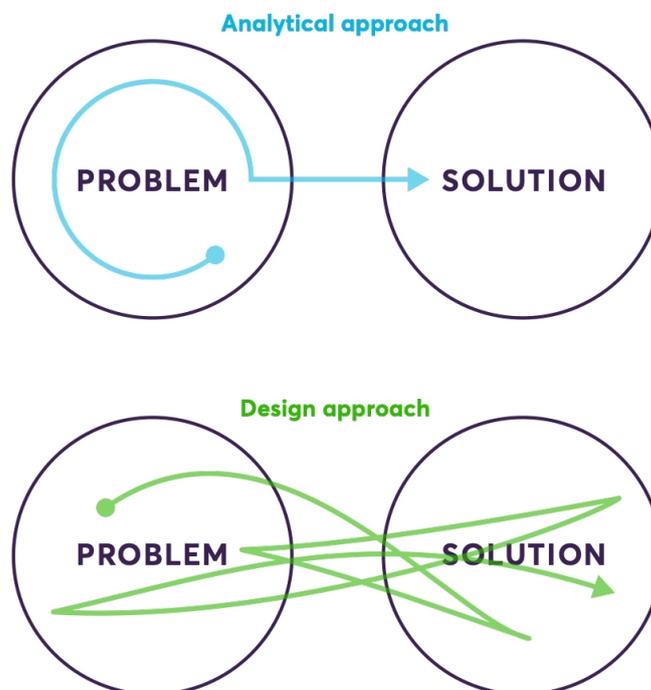


Figure 1.31: Différents styles de résolution d'après [LR18]

Chapitre 2

Faire émerger la conception architecturale

« Architecture begins where engineering ends »

Walter Gropius

L'intérêt récent porté pour l'architecture dans le domaine de l'ingénierie des systèmes complexes, et la volonté de vouloir la singulariser ouvre de nouvelles perspectives et champs d'investigations. Encore loin d'être une science ou une discipline, l'architecture se manifeste pour l'instant en tant qu'art [RM96] ou pratique [Sil14, CCS15]. Un des aspects nous apparaît particulièrement saillant dans la construction de ce nouveau domaine, celui de la conception. Notre contribution à la conception architecturale consistera à proposer un paradigme, étape importante pour pouvoir construire, et plus tard formaliser cette activité.

Dans ce chapitre, nous partirons d'une étude du contexte initial dans lequel va naître ce nouveau domaine, à savoir l'ingénierie système. Nous en ferons d'abord une synthèse historique en partant des années quarante jusqu'à nos jours, pour ensuite tenter d'en dégager une définition. Nous verrons qu'il y en a de multiples. Nous dégagerons à la fois une caractéristique commune, l'aspect multidisciplinaire, et un manque, la manière d'orchestrer ces disciplines entre elles. Pour mieux appréhender cette ingénierie, nous proposerons une approche consistant à chercher à la distinguer des autres ingénieries. Nous verrons ensuite en quoi ingénierie et architecture diffèrent et se complètent : analyse et synthèse, réductionnisme et holisme, algorithmique et heuristique, etc. Puis nous ferons ressortir les aspects remarquables de la démarche de conception architecturale : centrée et rythmée par des décisions clés, affrontant la complexité (ne la réduisant pas !), et requérant des modes de raisonnement appropriés (pensée système, pensée critique et raisonnement abductif). Enfin parmi tous les questionnements et toutes les perspectives que cela ouvre, nous poserons la manière et la méthode qui nous servira à aborder et traiter le point particulier consistant à doter l'architecture des systèmes artificiels complexes d'un paradigme et d'une démarche de la conception.

Sommaire

2.1	Le contexte initial : l'ingénierie système	46
2.2	Ingénierie et Architecture	55
2.3	Distinguer l'architecture	59
2.4	Viser un paradigme de la conception architecturale	70

2.1 Le contexte initial : l'ingénierie système

Avant de récemment s'émanciper, ou tout du moins d'être mise en exergue, l'architecture et la conception architecturale des systèmes artificiels est une partie intégrante de l'ingénierie des systèmes. Commençons donc par étudier cette matrice originelle.

Ingénierie Système ou *Ingénierie des Systèmes* ? Dans son ouvrage de référence [MF12] l'AFIS (*Association Française d'Ingénierie Système*) emploie le vocable d'ingénierie système. Dans leur ouvrage pédagogique [LR13] Dominique Luzeaux et Jean-René Ruault parlent expressément d'ingénierie système. Dans un récent article d'introduction [LRW15] les mêmes auteurs et moi-même nommons l'ingénierie système en tant que discipline. En revanche Wikipédia [Wik], ainsi que différentes universités ou écoles d'ingénieur proposent des programmes en utilisant la dénomination *Ingénierie des Systèmes*.

Nous nous proposons d'adopter les conventions suivantes dans ce manuscrit :

- L'ingénierie système dénotera soit une discipline, c.-à-d. la matière et les connaissances pouvant faire l'objet d'un enseignement, bien que n'étant pas forcément reconnue en tant que tel tant d'un point de vue scientifique qu'académique, soit un génie, c.-à-d. l'art et les techniques. Nous privilégierons l'ingénierie système en tant que génie.
- L'ingénierie des systèmes désignera la pratique consistant à faire l'ingénierie appliquée à des systèmes en s'appuyant, entre autres, sur le génie de l'ingénierie système.

2.1.1 Historique

L'ingénierie système est un génie récent, émergeant après la Seconde Guerre Mondiale pour répondre aux défis que posait la complexité croissante de l'ingénierie des systèmes spatiaux ou de défense. Son expansion à de nombreux domaines doit entre autres à un retour sur investissement démontré, sur la maîtrise tant des coûts que des délais [INC12, INC15]. Elle reprend à son compte les concepts issus de la théorie des systèmes, de la théorie de l'information, de la cybernétique, de l'architecture afin de donner aux ingénieurs les moyens, méthodes et outils pour maîtriser les systèmes artificiels qu'ils conçoivent [Sil12].

Retraçons-en l'histoire en remontant aux années quarante où le terme commence à être prononcé¹ jusqu'à nos jours.

Nous avons considéré ici que les contributions et les faits sur lesquels nous nous sommes appuyé pour bâtir notre perspective historique consisteraient, parfois en la parution d'articles, mais surtout très majoritairement en la publication d'ouvrages, de normes ou de standards. Le regroupement en périodes ou courants est la libre interprétation de l'auteur et constitue en cela une proposition d'une vision de l'évolution de l'ingénierie système au cours de plus d'un demi-siècle. Le lecteur pourra se reporter aux frises historiques données en annexe (cf. annexe A page 209) pour une mise en perspective graphique de cet historique.

Émergence de l'ingénierie système (1940..1970)

Les années quarante voient la conjonction de deux tendances :

1. D'après [Hal62] le terme d'ingénierie système ("Systems Engineering") a été employé pour la première fois par Bell Laboratories dans les années quarante, et les premiers cours dédiés à l'ingénierie système sont certainement ceux dispensés par G. W. Gilman au Massachusetts Institute of Technology dans les années cinquante.

- Sur le plan scientifique et théorique, l'apparition de nouvelles théories et tendances : la cybernétique [Wie48], la théorie de l'information [SW49], la théorie générale du système [Ber50] et l'idée d'une science de la complexité [Wea48] ;
- Sur le plan industriel et économique, la Seconde Guerre Mondiale va entraîner le développement de programmes d'armement, et encourager des progrès technologiques mettant en avant la nécessité d'apporter des solutions efficaces en termes d'ingénierie de grands systèmes complexes [BR84].

L'ingénierie système commence à voir le jour en réponse à des projets de plus en plus complexes, nécessitant une intégration multidisciplinaire, et une approche globale. Les premiers fondements d'une démarche d'ingénierie des systèmes sont posés :

- Analyse système [AK54, Hoa56, KM57],
- Allocation des fonctions sur les éléments physiques ou sur des rôles humains [Fit51].

Le rapport technique de John Warfield en 1955 [War55] prône la nécessité d'une ingénierie des systèmes pour maîtriser des projets ou programmes multidisciplinaires complexes et diminuer les risques d'échecs. Il établit une première synthèse, mettant en avant en particulier, la nécessité de planifier, de coopérer entre les disciplines, de tester et d'évaluer. Il pose la différence entre idéal (point de vue fonctionnel et usager) et optimalité (point de vue de la conception).

Les dix prochaines années verront la parution des premiers ouvrages de référence sur l'ingénierie système [GM57, Hal62, Gos62, Che65, Mac65, Che67, Wym67, Shi67], leurs titres comprennent explicitement le terme de *Systems Engineering*, donnant ainsi un corpus opérant à la fois pour les étudiants universitaires et les ingénieurs systèmes de terrain.

L'approche se fonde sur deux concepts essentiels [Has08] : systématique et systémique.

- Systématique, caractérisant la démarche scientifique prônée : une démarche méthodique, rigoureuse et ordonnée (« *on fait tout et dans le bon ordre* »). Dès le départ, l'ingénierie système spécifie et agence un certain nombre de processus ou d'activités pour non seulement spécifier et concevoir les systèmes, mais également les développer, les intégrer, les déployer, les opérer. . .
- Systémique, caractérisant la posture vis-à-vis de l'objet d'étude : l'objet est considéré dans son ensemble et dans toutes ses dimensions comme un tout (posture holistique, en opposition à une posture réductionniste), en élargissant le champ d'études en le contextualisant (posture constructiviste).

James Brill, dans son article sur une rétrospective de l'ingénierie système [Bri98], synthétise trois avancées majeures apportées par les contributions de cette époque :

- Le rassemblement et la composition d'un certain nombre d'activités jusque-là disparates en leur donnant une cohérence d'ensemble : "systems design entails many things: a new set of tools, a new classification of parts, an organized approach albeit seemingly chaotic, and a team of workers. The time is ripe to weld these many things together." ([GM57])
- La manifestation de l'ingénierie système comme méthodologie ou processus sera une des contributions majeures de Arthur D. Hall [Hal62].
- Le *meilleur conseil* de Shinnors [Shi67] pour adresser des problèmes de nature système est de tout d'abord bien poser et comprendre ledit problème.

Ces premiers ouvrages embrassent les différents concepts, techniques et méthodes à maîtriser dans le cadre d'une ingénierie des systèmes. Evoquons-en quelques-uns :

- La planification des activités au travers d'un cycle de vie de l'ingénierie. L'enchaînement des phases ou des étapes restant largement séquentiel (cycle d'ingénierie en chute d'eau ou *waterfall*), seuls sont concédés des bouclages ou des itérations locaux à des activités.
- La contextualisation du système dans ses différentes dimensions : physique (ou environnementale), technologique, économique, politique, sociale.
- La séparation entre domaine du problème et domaine de la solution.
- La recherche du besoin (des usagers) comme source primordiale à l'établissement des spécifications du système.
- La notion de valeur, aussi bien dans sa dimension économique (coût, profit. . .) que dans sa dimension subjective ou perceptive (par exemple, en reprenant les travaux sur la théorie de l'utilité de von Neumann et Morgenstein).
- La notion d'optimalité, en incorporant entre autres les travaux sur la recherche opérationnelle, en pleine expansion à l'époque.
- La difficulté à faire un choix, et les différentes techniques pour l'aide à la décision (multi-critères, mais également théorie des jeux, analyses statistiques. . .).
- L'art de conduire des analyses système (Systems Analysis). Nous avons déjà évoqué les travaux de la RAND Corporation dans les années cinquante [AK54, Hoa56, KM57] qui établissent un corpus et donnent ses lettres de noblesse à cette activité fondamentale de l'ingénierie des systèmes. Sans oublier de compléter cela par l'art d'effectuer des synthèses système.
- La nécessité de disposer et mettre en œuvre des connaissances disciplinaires (souvent *focalisées* sur les différentes divisions du génie électrique : communication, électronique, automatique, traitement du signal. . .).
- La nécessité de contrôler et réguler les systèmes à bon escient (infusion des apports de la cybernétique), assortie de l'étude méticuleuse des différentes entrées et sorties du système, et de leurs traitements associés.
- La fiabilité des systèmes (les prémisses de la sûreté de fonctionnement).
- La modélisation comme support à l'ingénierie, à la fois mathématique, mais également diagrammatique (ce qui sera redécouvert bien des années plus tard en le nommant MBSE, *Model-Based System Engineering*). Nous ne pouvons pas ici ne pas rendre hommage aux travaux de A. Wayne Wymore qui contribua à poser des fondations mathématiques à l'ingénierie système dans les années soixante [Wym67], et sera un des pionniers dans l'avènement du *Model-based Systems Engineering*. Son livre éponyme [Wym93], certainement le premier du genre, date du début des années quatre-vingt-dix.
- La conception fonctionnelle (fonction, enchaînements, entrée/sortie, scénarios) et la conception physique (composants, liens, arrangement, groupement), ainsi que l'allocation des fonctions sur les constituants.
- L'importance de la définition et de la conduite de tests est mise en avant pour la vérification et la validation du système (son domaine fonctionnel, l'atteinte des objectifs. . .).

- Le coût et les modèles de coût, intégrant à la fois un aspect structurel du système (les éléments qui le composent) et un aspect temporel (son cycle de vie, y compris les opérations).

De cette énumération, nous pouvons nous apercevoir que nombre de fondamentaux de l'ingénierie des systèmes sont d'ores et déjà établis. Une lecture attentive des ouvrages cités ferait ressortir que la grande majorité des outils et méthodes proposées s'appuient sur des théories scientifiques et des fondements mathématiques solides. Cette période-là nous laisse donc un socle précieux et un corpus de processus, méthodes, techniques et outils convenablement complet. Une faiblesse, bien compréhensible quand nous le remettons dans son contexte historique, tient sans doute dans l'absence de recours à des techniques informatiques utilisées de nos jours pour la formalisation et la capitalisation de la connaissance, l'exploration d'alternatives, la simulation de comportement, la description ou spécification normée ou standardisée de solutions. . .

La pratique de l'ingénierie système se concrétise et s'observe principalement dans de grands programmes d'armement (ICBM – *Intercontinental Ballistic Missile development program* –, SAGE – *Semi-Automatic Ground Environment Air Defense System development program* – . . .), et dans la conquête spatiale (Mercury, Apollo, Gemini. . .).

Consolidation de l'ingénierie système (1970..1990)

Sans que de grandes avancées majeures n'interviennent, la période voit la parution d'ouvrages qui complètent et consolident les bases posées précédemment, par quelques auteurs de renom, reconnus aujourd'hui comme des contributeurs majeurs à l'ingénierie système. Citons de manière non exhaustive : Andrew Sage [Sag77], A. Wayne Wymore [Wym76], Blanchard et Fabrycky [BF81].

Dans son article sur une rétrospective de l'ingénierie système [Bri98], James Brill met en lumière trois points importants dans cette consolidation de l'ingénierie système :

- Dans ses cours sur l'ingénierie système [MJ73], S. Ramo met l'accent sur la nécessité d'avoir une approche holistique. La compréhension du problème et la conception de la solution se doit de considérer l'objet d'étude comme un tout, distinct de ses parties constitutives. Cette approche s'oppose à la posture cartésienne qui préconise de découper un problème compliqué ou complexe en un ensemble de sous-problèmes, eux moins compliqués ou complexes à aborder.
- La nécessité de constituer et de travailler en équipes interdisciplinaires [Wym76]. Pour cela, il faut pouvoir disposer d'un langage commun de l'ingénierie système [Cha74].
- Faire l'ingénierie système d'un système c'est l'aborder en considérant et en préoccupant de l'intégralité de son cycle de vie : de sa naissance à sa mort [BF81].

C'est aussi dans cette période que sort un des tout premiers standards industriels sur l'ingénierie système : la MIL-STD-499 [DoD74].

Expansion et diffusion de l'ingénierie système (1990..2020)

En 1990, l'INCOSE ("International Council on Systems Engineering") est créée. Elle regroupe aussi bien les professionnels de l'ingénierie système que les chercheurs et les enseignants. Elle vise à rassembler et à disséminer les pratiques de l'ingénierie des systèmes, alors même que la détermination et la caractérisation de cette discipline restent floues, voire sujettes à controverses [Bri98].

Parallèlement, des groupes de travail vont être mis en place dans certaines sociétés savantes et normatives internationales : IEEE, IEC. . .

Au-delà de nombreux ouvrages généralistes [CBW92, Hit92, Sag92, Tho93, Mar96, SR99, Bue00, KS02, Hit07], cette période verra fleurir :

- Des standards en ingénierie système : IEEE 1220 [IEE99, IEE05], EIA 632 [EIA99, EIA03], ISO/IEC 15288 [ISO02, ISO08, ISO15]. . .
- Des guides : NASA Systems Engineering Handbook [NAS95, NAS07, NAS17], Systems Engineering Fundamentals [DoD01], FAA Systems Engineering Manual [FAA06], INCOSE Systems Engineering Handbook [INC06, INC07, INC10, INC12, INC15]. . .
- De nombreuses formations académiques de niveau master. En particulier, notons qu'en France depuis 2014 la mention « *Ingénierie des systèmes complexes* » est une mention officielle pour un master [dISedIR14].

Cet ensemble (ouvrages, formations, normes et standards, guides) témoigne de l'ancrage et la reconnaissance de l'ingénierie système comme un génie, voire une discipline en devenir, à considérer pour affronter et faire l'ingénierie de systèmes complexes. L'ingénierie des systèmes se répand dans les divers secteurs industriels.

2.1.2 Tentatives de définition

Un ingénieur système, comme un ingénieur *tout court* d'ailleurs, concrétise dans son travail un subtil équilibre entre génie, science, mathématiques, technologie et art. La dimension *système* augmente l'emprise de chacune des connaissances et savoir-faire précités. Elle souligne aussi la nécessaire maîtrise des relations et interdépendances entre ces disciplines, domaines et technologies. Ceci ne nous donne pas véritablement une compréhension effective du rôle d'un ingénieur système. Pour ajouter à la difficulté, Sarah Sheard, dans un article de référence au sein de l'INCOSE (*International Council on Systems Engineering*, association de référence dans le domaine de l'ingénierie des systèmes) [She96] en définit douze différents ! Des rôles avec à la fois un contenu technique, scientifique ou méthodologique (concepteur, analyste, vérificateur) ou un contenu managérial (coordinateur, interface/cohésion entre équipes).

Le métier d'ingénieur est souvent comparé à celui d'un chef d'orchestre. Cette analogie, bien que limpide, n'en est pas moins restrictive. Si le chef d'orchestre exécute, ou plutôt conduit l'exécution d'une œuvre par un ensemble d'interprètes à partir d'une partition, c.-à-d. un plan normé de l'œuvre orchestrale, et si sa valeur ajoutée est indéniable, l'aspect création ou démarche de recherche d'un idéal à atteindre est oublié. Pour être plus complet, et toujours en gardant cette analogie musicale, l'ingénieur système peut être, suivant son implication et suivant l'avancement dans le cycle de vie du système :

- le compositeur, celui qui transforme une idée en le plan d'une œuvre orchestrale traduisant au mieux cette idée ;
- le chef d'orchestre, celui qui comprend, restitue l'œuvre, la réalise par la direction des différents interprètes.

Nous pourrions également recourir à l'analogie avec le monde cinématographique [LMW14] qui montrerait peut-être plus de facettes et de rôles, en proposant que le rôle d'ingénieur système recouvre les rôles du scénariste, du metteur en scène et du réalisateur, voire dans certains cas du producteur.

Nous voyons poindre au travers de ces différents rôles et facettes de l'*ingénieur système* une possible dichotomie entre un ingénieur système *compositeur* et ingénieur système *orchestrateur*, et quelque part entre architecture et ingénierie. Admettons que les savoirs et les savoir-faire pour endosser ces différents rôles sont de natures variées et potentiellement disparates. Et que cela ouvre la porte à particulariser un rôle particulier s'appuyant sur un art et des techniques propres.

L'AFIS, toujours dans son ouvrage de référence [MF12], définit l'ingénierie système comme : « [...] une démarche méthodologique coopérative et interdisciplinaire, fondée sur la science et l'expérience, qui englobe l'ensemble des activités adéquates pour concevoir, développer, faire évoluer et vérifier un ensemble de produits, processus et compétences humaines apportant une solution économique et performante aux besoins des parties prenantes et acceptables par tous. »

Le tableau 2.1 donne d'autres définitions de l'ingénierie système issues de sources diverses, à la fois normes, standards, ou ouvrages de référence.

TABLE 2.1: Quelques définitions de l'ingénierie système extraites de [LRW15]

Référence	Définition
NASA Systems Engineering Handbook Rev1 [NAS07]	"An interdisciplinary approach encompassing the entire technical effort to evolve and verify an integrated and lifecycle balanced set of system people, product, and process solutions that satisfy customer needs. Systems engineering encompasses (a) the technical efforts related to the development, manufacturing, verification, deployment, operations, support, disposal of, and user training for, system products and processes; (b) the definition and management of the system configuration; (c) the translation of the system definition into work breakdown structures; and (d) development of information for management decision-making."
NASA Systems Engineering Handbook Rev2 [NAS17]	"At NASA, "systems engineering" is defined as a methodical, multi-disciplinary approach for the design, realization, technical management, operations, and retirement of a system. [...] systems engineering is a logical way of thinking. Systems engineering is the art and science of developing an operable system capable of meeting requirements within often opposed constraints. Systems engineering is a holistic, integrative discipline, wherein the contributions of structural engineers, electrical engineers, mechanism designers, power engineers, human factors engineers, and many more disciplines are evaluated and balanced, one against another, to produce a coherent whole that is not dominated by the perspective of a single discipline."
Référentiel du modèle SE-CMM (Systems Engineering Capability Model of Maturity) [BKW ⁺ 95]	"System engineering is the selective application of scientific and engineering efforts to: – transform an operational need into a description of the system configuration which best satisfies the operational need according to the measures of effectiveness; – integrate related technical parameters and ensure compatibility of all physical, functional and technical program interface in a manner which optimizes the total system definition and design; – integrate the efforts of all engineering disciplines and specialties into the total engineering effort."
Derek Hitchins, fondateur du chapitre britannique de l'INCOSE [Hit13]	"– The Art and Science of creating effective systems, using whole system, whole life principles. – The Art and Science of creating optimal solution systems to complex issues and problems."

TABLE 2.1: Quelques définitions de l'ingénierie système (suite)

Référence	Définition
J.-P. Meinadier et S. Fiorese, <i>Découvrir et comprendre l'ingénierie système</i> [MF12]	« <i>Processus collaboratif et interdisciplinaire de résolution de problèmes, s'appuyant sur les connaissances, méthodes et techniques issues des sciences et de l'expérience, mis en œuvre pour définir un système qui satisfasse un besoin identifié, et soit acceptable pour l'environnement, en cherchant à équilibrer l'économie globale de la solution, sur tous les aspects du problème dans toutes les phases du développement et de la vie du système.</i> »
Harry H. Goode et Robert E. Machol, <i>System engineering : an introduction to the design of large-scale systems</i> [GM57]	"The concept from the engineering standpoint is the evolution of the engineering scientist, i.e., the scientific generalist who maintains a broad outlook. The method is that of the team approach. On large-scale-system problems, teams of scientists and engineers, generalists as well as specialists, exert their joint efforts to find a solution and physically realize it [...] The technique has been variously called the systems approach or the team development method."
Harold Chestnut, <i>Systems Engineering Tools</i> [Che65]	"The systems engineering method recognizes each system is an integrated whole even though composed of diverse, specialized structures and sub-functions. It further recognizes that any system has a number of objectives and that the balance between them may differ widely from system to system. The methods seek to optimize the overall system functions according to the weighted objectives and to achieve maximum compatibility of its parts."
George Muller et Simon Ramo (programme Apollo), <i>Doing the Impossible : George E. Mueller and the Management of NASA's Human Spaceflight Program</i> [Slo12]	"System engineering is a discipline which involves all of engineering and [...] has to be applied to a particular system [...] A system engineer is a peculiar form of generalist with the faculty of understanding enough of each of the pieces and good at communications."
Définition officielle de l'INCOSE [Inc18]	"Systems Engineering is an interdisciplinary approach and means to enable the realization of successful systems. It focuses on defining customer needs and required functionality early in the development cycle, documenting requirements, then proceeding with design synthesis and system validation while considering the complete problem: Operations, Performance, Test, Manufacturing, Cost & Schedule, Training & Support, Disposal. Systems Engineering integrates all the disciplines and specialty groups into a team effort forming a structured development process that proceeds from concept to production to operation. Systems Engineering considers both the business and the technical needs of all customers with the goal of providing a quality product that meets the user needs."

Il ressort de ces différentes définitions un point fondamental : l'ingénierie système est une démarche multidisciplinaire, voire interdisciplinaire orchestrant les différentes contributions dans un effort global et cohérent. Les normes ou standards récents [ISO15, IEE05, EIA03] ou le guide de référence servant de base à la certification en ingénierie système [INC15] découpent le processus d'ingénierie systèmes en diverses activités ou sous-processus (pas moins de trente dans la ISO/IEC/IEEE 15288 :2015, la norme de référence

en ingénierie système à ce jour), diverses étapes ou phases, mais n'abordent pas la manière de les coordonner, de les orchestrer tous ensemble. De manière un peu provocante, nous pourrions affirmer que le processus manquant dans l'ingénierie système . . . c'est l'ingénierie système, c.-à-d. comment orchestrer dans un effort global et cohérent les différentes composantes disciplinaires qui forment l'ingénierie des systèmes.

Reprenons l'analogie musicale évoquée dans cette section. Tout groupe musical pour jouer une musique de qualité a besoin de se reposer sur un socle de départ : dans une forme aboutie, à savoir la partition d'un compositeur, telle quelle ou avec arrangements, ou dans une forme plus esquissée (un motif, une mélodie, une ritournelle, un refrain, un riff. . .). Même dans le cas de groupes jouant sans partition et laissant une grande place à l'improvisation, il y a toujours un point de départ : une mélodie, un tempo, un rythme, des règles (non visibles) entre les joueurs pour se synchroniser.

Nous prétendons qu'il en est de même pour l'ingénierie des systèmes. Sa mise en œuvre requiert un point de départ, une orientation, à savoir une architecture. La conception architecturale devient alors un aspect fondamental de la maîtrise et du développement des systèmes artificiels complexes.



Point important 2.1

[L'architecture, clé de voûte de l'ingénierie des systèmes]

La capacité à mettre en œuvre une ingénierie des systèmes artificiels complexes repose sur la disponibilité et le partage d'une architecture, plus ou moins aboutie.

2.1.3 Particularités

Les définitions précédentes restent souvent trop vagues sur ce que recouvre l'ingénierie système. Une manière de contourner cette difficulté réside dans la détermination d'un certain nombre de défis spécifiques auxquels l'ingénierie des systèmes est confrontée, et dans l'examen de ce qui la différencie des autres ingénieries :

point de vue externe et interne, voire omniscient	en utilisant la littérature et plus particulièrement la narration comme métaphore, l'ingénierie système va <i>raconter l'histoire</i> du système en n'adoptant pas un point de vue narratif unique, mais en les variant et en étudiant le système d'un point de vue externe (le système comme une entité intègre évoluant dans un contexte plus large et donc interagissant avec d'autres entités), d'un point de vue interne (le système comme étant constitué d'entités structurellement liées et interagissant entre elles), voire d'un point de vue omniscient (la vision évolutive de l'ensemble des entités et de l'ensemble des liens ou relations entre-elles) ;
non-séparabilité du contexte	elle découle naturellement de la diversité des points de vue à adopter, et est aussi liée à une spécificité de la notion même de système qui consiste à réfuter un réductionnisme consistant à étudier le système indépendamment de son contexte ;
hétérogénéité et pluridisciplinarité	les systèmes concernés par l'ingénierie système sont par nature souvent hétérogènes (c.-à-d. composés d'éléments de nature différente) et complexes (nombreux éléments en présence de boucles, d'interactions, d'interconnexions pouvant évoluer dans le temps). Ils renvoient donc à une pratique multidisciplinaire là où les connaissances et les compétences acquises par une seule discipline ne suffisent plus à accéder à la compréhension et la maîtrise, et où une coopération entre disciplines devient indispensable ;

structure, organisation	les systèmes vont devoir être appréhendés d'un point de vue structurel ou organisationnel, en se focalisant davantage sur les liens entre les éléments, la nature de ces liens et les interactions engendrées, que sur les éléments eux-mêmes. Notons au passage que cette structure ou organisation n'est a priori pas figée dans le temps, mais est dans la plupart des cas dynamique. La prise en compte de cette dynamique et de son évolution au cours de la vie du système est une des dimensions remarquables de l'ingénierie système ;
comportement, émergence	la maîtrise des comportements émergents des systèmes, qu'ils soient voulus ou inattendus, ou parfois contingents provoqués par les interactions entre les différents éléments constitutifs et les interdépendances entre ces éléments, est un autre des préceptes clés de l'ingénierie système. La complexité des comportements et la nécessaire maîtrise de partie d'entre eux est une problématique croissante, qui nécessite de remettre en cause des principes simplificateurs et impose la prise en compte de : non-linéarité, non-causalité, rétroaction, variabilité en fonction de l'histoire du système. . .
idéal et optimalité	en paraphrasant J. Warfield dans son article d'introduction à l'Ingénierie Système [War55], l'ingénierie système se doit de conceptualiser et formaliser ce que doit être le système idéal (celui qui serait le plus adapté à sa finalité), et de concevoir et développer le système optimum (celui qui, compte tenu de l'ensemble des contraintes, optimise la distance à l'idéal) ;
esprit critique et mode de raisonnement adapté	certain aspects des systèmes et de leur ingénierie sont largement contre-intuitifs ; l'ingénierie système ne peut se contenter d'un mode de pensée ou de raisonnement uniques, mais repose sur une adoption opportune du mode de pensée et de raisonnement, ainsi que sur un équilibre entre analyse et synthèse, induction et déduction, etc.
la récursivité	de la notion même de système, ou simplement son aspect d'organisation hiérarchique appelle à déployer l'ingénierie système simultanément sur plusieurs niveaux de décomposition ou d'intégration. Le maintien et la cohérence de propriétés, caractéristiques, concepts entre ces différents niveaux obligent l'ingénierie système à affronter le passage à l'échelle dans son approche.

L'ingénierie système construit et s'enrichit de deux logiques complémentaires : d'une part, la théorie des systèmes [Ber69, dR77, LM90], d'autre part, l'ingénierie. De la théorie des systèmes, elle reprend le principe holistique (le tout est supérieur à la somme des parties), ainsi que les concepts d'émergence, d'interaction. De l'ingénierie, elle reprend le principe de la prééminence de la finalité pour tout travail de conception et de réalisation, ainsi que les concepts d'architecture, de spécification, de définition, de qualification.

De là découle un travail sur l'organisation, la structuration, le fonctionnement du système afin de satisfaire les besoins exprimés, d'atteindre un certain nombre d'objectifs quantifiés, et de réaliser des effets recherchés. Le concepteur cherchera à produire les effets désirés (les comportements émergents positifs) et à limiter, voire à interdire les effets non désirés (les comportements émergents négatifs).

À partir de là comment opérer une partition effective entre ingénierie et architecture, et ainsi *extraire* l'architecture pour la mettre en exergue de l'ingénierie système ? Nous allons consacrer la section suivante à cette différence et complémentarité entre architecture et ingénierie.

2.2 Ingénierie et Architecture

2.2.1 Système et Architecture

Commençons notre investigation en confrontant différentes définitions d'un système avec différentes définitions d'une architecture.

Système

Joël de Rosnay	« <i>Un ensemble d'éléments, en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but.</i> » [dR77]
Jean-Louis Le Moigne	« <i>Quelque chose qui fait quelque chose (activité = fonction) et qui est doté d'une structure, qui évolue dans le temps, dans quelque chose (environnement) pour quelque chose (finalité).</i> » [LM90]
MIL-STD-499	"An integrated composite of people, products, and processes that provide a capability to satisfy a stated need or objective." [DoD74]
ISO 15288	"A combination of interacting elements organized to achieve one or more stated purposes" [ISO08]
EIA 632	"The aggregation of end products and enabling products that achieves a given purpose." [EIA03]

Architecture

ISO/IEC/IEEE 42010	"The fundamental concepts or properties of a system in its environment embodied in its elements, relationships, and in the principles of its design and evolution." [ISO11]
TOGAF	"The structure of components, their inter-relationships, and the principles and guidelines governing their design and evolution over time." [For18] Nota : TOGAF 9.2 adopte deux définitions de l'architecture. Celle précitée de l'ISO/IEC/IEEE 42010 et celle-ci.
Frey	"The structure, arrangements or configuration of system elements and their internal relationships necessary to satisfy constraints and requirements." [Cra07]
John W. Evans	"An architecture is the conceptualization, description, and design of a system, its components, their interfaces and relationships with internal and external entities, as they evolve over time." [Mag10]
Crawley	"The embodiment of concept, and the allocation of physical/informational function to elements of form, and definition of interfaces among the elements and with the surrounding context." [Cra07]
Crawley, Cameron and Selva	"The simplest notion of architecture [...] is that architecture is an abstract description of entities of a system and the relationship between those entities. In systems built by human, this architecture can be represented as a set of decisions " [CCS15]
Reekie and McAdam	"The whole consists of parts; the parts have relationships to each other; when put together, the whole has a designed purpose and fills a need. " [RMM06]
Ulrich and Eppinger	"The arrangement of the functional elements into physical blocks." [EU12]

Joel Moses “An architecture is a plan for change .” [Mag10]

Nous pouvons noter une assez grande diversité dans la définition d'une architecture, et également une proximité avec la notion de système. Les quatre premières en font une caractéristique consubstantielle d'un système. Les quatre suivantes se focalisent sur les aspects fonctionnels d'un côté et physiques de l'autre, augmenté de la projection ou du passage des uns aux les autres. Seule la dernière définition, celle de Joel Moses, sort du lot en proposant une vision temporelle de l'architecture, vision que nous reprendrons fortement lorsque nous bâtirons notre proposition de paradigme.

En revanche, ces différentes définitions nous éclairent assez peu sur comment distinguer et particulariser l'architecture dans un contexte d'ingénierie des systèmes. Il va nous falloir creuser plus avant.

2.2.2 Faire de l'ingénierie et architecturer

Il est nécessaire de faire la distinction entre une démarche d'architecture (système) et une démarche d'ingénierie (système). À la fois les postures à adopter et à la fois les techniques et méthodes à mettre en œuvre diffèrent.

Tout d'abord, sans sombrer dans des querelles byzantines ou disputes sémantiques, faisons quelques remarques sur le vocabulaire. Sa mise en regard avec la langue anglaise permet de saisir le désarroi auquel nous pourrions être confronté.

Architecturer est un verbe en français, non en anglais (néologisme en anglais américain – entrée inexistante dans le Merriam Webster – et connoté génie logiciel en anglais britannique – “Design and configure (a program or system)” dans l'Oxford).

Concevoir n'a pas de traduction fidèle en anglais, “to design” en est la traduction la plus rapprochée, mais approximative (ne parlons pas de “to conceive” en anglais, qui veut dire avant tout faire un enfant, conception ici dans son sens premier). Du coup, le terme de *Architectural Design* a disparu des normes et standards liés à l'ingénierie et l'architecture des systèmes au profit de :

- Une partition entre *Architecture Definition* et *Design Definition* dans l'ISO 15288 [ISO15].
- Un triplé de processus cœur (*Architecture conceptualization*, *Architecture evaluation*, *Architecture elaboration*) dans l'ISO/IEC/IEEE 42020 [ISO17].

Plutôt que de les opposer, nous serions plus avisé de promouvoir la dualité et la complémentarité, entre architecture et ingénierie. Cette distinction existe depuis longtemps dans d'autres domaines comme le bâtiment (architecture et génie civil), le naval (architecte naval et chantiers navals).

Brad Mercer de la MITRE Corporation [Mer08] pointe la différence entre les deux en notant la complémentarité entre *analyse des fonctions* et *synthèse de la forme*, reprenant en cela le terme donné par Christopher Alexander [Ale64], un des pionniers dans la formalisation de la conception architecturale :

Engineering “Engineering employs analysis of function to iteratively decompose and separate a primarily functional representation of a whole into representations of economically producible components that can be assembled to construct the functional whole.”

Architecting “Architecting employs synthesis of form to iteratively compose separate elements to form a coherent whole, or a representation of a coherent whole, that can serve as an *initial point* for system development.”

Le tableau ci-après, extrait de [Mer08] (traduit par l'auteur) liste ces complémentarités.

TABLE 2.2: Complémentarité entre architecture et ingénierie

Architecture	Ingénierie
Synthèse de la forme	Analyse des fonctions
Holistique	Réductionniste
Affronte la complexité	Simplifie la complexité
Valeur qualitative	Coût quantitatif
Abductif	Déductif
Heuristique	Algorithmique
Le <i>quoi</i>	Le <i>comment</i>
Accent sur le sens (sémantique)	Accent sur l'arrangement (syntaxe)
Interfaces externes, ouverture	Interfaces internes, limitation
Abstrait, théorique	Précis, exact
Produit des spécifications d'architecture	Produit des spécifications de réalisation
Conception architecturale	Conception centrée ingénierie

Détaillons certaines de ces complémentarités.

Holistique versus
réductionniste

L'approche holistique (du grec ancien ὅλος / hólós signifiant entier), d'un point de vue ontologique (vision du monde), considère qu'un système complexe n'est pas réductible (approche réductionniste) à l'ensemble ou l'agrégation de ses parties, mais que le tout est plus grand que la somme des parties. De fait, les propriétés de tels systèmes ne peuvent se déduire de la seule connaissance de leurs parties (principe d'émergence). En architecture, la *synthèse de la forme* ne saurait se réduire à une vision extensionnelle des parties la constituant.

Affronter la
complexité versus la
simplifier

Saisir la complexité d'un système se fait selon Edgar Morin [Mor05] suivant trois perspectives paradoxales :

- Le tout est plus grand que la somme des parties. Il s'agit du principe d'émergence vu précédemment.
- Le tout est plus petit que la somme des parties. Composer des éléments entre eux limite leur autonomie respective, leurs degrés de liberté. Ils perdent une partie de leur individualité en se fondant dans le tout.
- La prise de conscience de cette contradiction inhérente.

Affronter la complexité n'est pas refuser la simplicité, c'est assumer la contradiction, l'incertain, accepter qu'une part échappe à certaines formes de rationalités par ailleurs souvent limitées. Adopter une pensée complexe ne rejette pas une pensée simplificatrice, mais si elle s'appuie dessus, elle ne s'en contente nullement et la complète. La simplification tente de mettre de l'ordre en rationalisant suivant des principes de disjonction et réduction, en laissant de côté l'incertain, le désordre apparent. La pensée complexe en prend le contre-pied en se basant sur les principes de distinction et conjonction, et d'implication. Il s'agit selon Edgar Morin d'effectuer en une même opération apparemment paradoxale de séparer et de joindre : « *vous allez joindre l'Un et le Multiple, vous allez les unir, mais l'Un ne se dissoudra pas dans le multiple et*

le multiple fera quand même partie de l'Un » ([Mor05]). Affronter la complexité se fait en raisonnant sur des modèles au bon niveau d'abstraction ou suivant la bonne perspective, leur nécessaire caractère parcimonieux n'imposant pas la simplification.

Abductif versus
déductif

C'est certainement là une des discordances majeures sur les modes de raisonnement entre une démarche d'ingénierie et une démarche architecturale. Si le couple induction/déduction est souvent mis en avant dans les démarches de type résolution de problèmes, l'inférence abductive, à notre sens l'inférence primordiale dans une démarche de conception architecturale, est trop souvent ignorée. Nous lui consacrerons un passage complet (cf. section 2.3.2 page 64), sous la dénomination que lui donna Umberto Eco : la méthode du détective [Eco92].

Ajoutons à ces complémentarités de [Mer08] quelques compléments de notre cru.

Multi-tout versus
multi-ingénierie

Là où une conception système met en œuvre différentes ingénieries (à la fois disciplinaires – mécanique, électrique, thermique, logicielle... – et transverses – facteur humain, sûreté, sécurité... –), la démarche architecturale requiert souvent d'élargir son champ d'implication au-delà de ces ingénieries en incorporant des aspects tels : la politique, la stratégie, le marketing, l'environnement, le juridique, le social ou le sociétal, la culture... .

Décisions
structurantes et
entremêlées versus
décisions locales et
concourantes

Les deux démarches sont rythmées par des prises de décision. C'est la façon cadencée d'avancer dans l'inconnu. Pour autant, les natures des décisions ne sont pas équivalentes. Les décisions architecturales façonnent la solution dans son ensemble et l'orientent dans une direction générale, un axe distinctif. Leur remise en cause effondrerait la cohérence et l'intégrité de la proposition. Ces décisions *tiennent* la solution. D'autres décisions sont plus locales, et complètent la définition précise de la solution. Ces choix ne remettent pas en cause l'intégralité de la solution et peuvent donc être retardés au maximum (et surtout intervenir causalement une fois les choix architecturaux verrouillés). Ils sont suffisamment non corrélés entre eux pour être traités de manière concourante (posture analytique) au contraire des choix architecturaux qui nécessitent une posture holistique. Nous indiquerons ultérieurement des indications pratiques permettant de distinguer entre décisions architecturales et décision d'ingénierie. Mentionnons ici quelques contrastes :

Rationalité des alternatives De manière simplifiée, supposons qu'une décision nous confronte à deux alternatives *a* et *b*. Le choix dans un contexte d'ingénierie se formaliserait en logique propositionnelle par une simple disjonction (exclusive ou inclusive) : $(a \vee b)$ ou $(a \oplus b)$, alors que le choix dans un contexte architectural pourrait être confronté à des contradictions, des dilemmes... comme : $(a \rightarrow b) \wedge (b \rightarrow \neg a)$.

Résolution de l'information Souvent l'information dont nous disposons dans un contexte de conception architecturale est incertaine, floue, incomplète. Cette résolution s'améliore au fur et à mesure de l'avancement et donc de la profondeur de l'analyse, passant souvent d'une vision qualitative à une vision quantitative.

Conjonction
complexe vs
disjonction
compliquée

Une des conséquences de l'adoption d'une pensée complexe aboutit à privilégier la définition d'une architecture sous forme de principes (règles d'organisation, principes de composition des éléments entre eux...). L'ingénierie de ces systèmes complexes repose plutôt sur une découpe idoine en constituants élémentaires, éventuellement sur

plusieurs niveaux de hiérarchie, et des propositions d'agrégat de ces constituants. Pour utiliser une analogie, nous retrouvons là une différence dans la théorie des ensembles entre définir un ensemble en compréhension et le définir en extension ; nous pourrions même pousser cette comparaison, et posant qu'un ensemble qui serait uniquement défini en extension et pour lequel nous ne parviendrions pas à l'exprimer en compréhension, ne posséderait pas d'architecture intelligible. Dans un cas, l'abstraction sous forme de principes permettrait de saisir la complexité, ou tout au moins de rendre intelligible le tissage des éléments entre eux, quand dans l'autre cas nous ne rendrions compte que d'un pliage compliqué.

Informatif et intentionnel plutôt que complet et cohérent

Une définition architecturale se doit d'orienter et de donner un cadre aux divers travaux (d'ingénierie et autres) accompagnant le cycle de vie du système considéré qui en émanent. En ce sens, elle ne saurait être trop précise ou trop contraignante, donnant trop de détails, mais au contraire suffisamment floue et incertaine de manière à laisser libre cours aux diverses ingénieries. Elle ne doit pas résoudre tous les problèmes (c'est le rôle des travaux des ingénieries), mais plutôt permettre de comprendre dans quel contexte ils se posent et vers quelles finalités la solution doit tendre.

2.3 Distinguer l'architecture

2.3.1 Décisions architecturales

Il ressort de ce parcours entre architecture et ingénierie qu'une ligne de démarcation se situe sur la nature des décisions prises. Cela nous semble être une partition opérante pour délimiter ce qui relève de l'architecture de ce qui relève de l'ingénierie.

Afin d'aboutir à une solution architecturale, un certain nombre de décisions structurantes par rapport à cette architecture doivent être instruites et prises. *A contrario*, d'autres décisions plus locales, plus de détail, doivent être reportées afin de laisser de la flexibilité dans l'ingénierie et la conception système ultérieure. Une décision réduit l'incertain, en réduisant *de facto* l'ensemble des possibles. Prendre des décisions rythme le processus de convergence vers la solution architecturale, chaque décision façonnant un peu plus la solution. D'où le questionnement suivant pour nous permettre de rythmer la conception de la solution architecturale :

- Quelles sont les décisions architecturales à instruire et à prendre ?
- Réciproquement, quelles sont les décisions d'ingénierie ou de conception qu'il faut laisser ouvertes ?
- Dans quel ordre les prendre ?
- Qu'est-ce qui principalement guide les choix d'architecture à effectuer ?

Répondre à la dernière question soulevée, revient à identifier quels sont les moteurs de la conception architecturale (*architectural drivers*).

Pour cela, posons-nous la question : « *Qu'est-ce qui peut influencer sur la démarche de conception architecturale ?* ». Nous suggérons de particulariser quatre sources majoritaires.

attentes principales En regroupant toutes les attentes de l'ensemble des parties prenantes nous pourrions être submergés à la fois par leur nombre, par leur ambiguïté, voire les contradictions entre elles. La hiérarchisation des attentes doit faire émerger, de cette collection

potentiellement très nombreuse, les quelques attentes importantes, c.-à-d. celles susceptibles d'apporter une grande satisfaction aux parties prenantes. Ce choix d'attentes principales doit être motivé relativement à l'importance et l'influence des parties prenantes, leurs enjeux, leurs motivations et relativement à la perception de l'architecte (sa vision de la valeur).

contraintes
majoritaires

Une contrainte exprime des restrictions en terme de solutions admissibles. Nous avons souvent une vision négative des contraintes comme étant quelque chose qui va venir restreindre notre liberté d'action, ou être une sorte d'épée de Damoclès pesant sur l'élaboration de l'architecture. Or les contraintes doivent être perçues au contraire comme un moteur dans l'élaboration d'architectures, évitant de se disperser dans trop de directions, guidant dans le façonnage de la solution architecturale et parfois alimentant une approche plus créative. Les contraintes sont cumulatives, chaque contrainte individuelle sépare l'espace des possibilités en une zone acceptable et une zone inacceptable. L'intersection de l'ensemble des zones acceptables doit déterminer l'espace de possibilités pour lequel l'ensemble des parties prenantes peut trouver satisfaction, aucune des contraintes n'étant violée. L'ensemble des différentes attentes avec leurs ambiguïtés et leurs contradictions doit permettre d'élaborer une proposition de valeur, c'est-à-dire une sélection assumée d'attentes à privilégier. L'ensemble des contraintes détermine un espace dans lequel cette proposition de valeur peut advenir. Cette approche a l'avantage de déterminer *a priori* une zone dans laquelle tout le monde peut se sentir à l'aise et ainsi de proposer d'emblée des solutions acceptables, favorisant ainsi la convergence vers une solution satisfaisante pour l'ensemble des parties prenantes.

points clés et
critiques

Les points clés et critiques sont les quelques points majeurs sur lesquels l'architecte va porter son attention, et sur lesquels il va façonner ses différentes propositions. Parmi tous les points particuliers qui pourraient attirer l'attention de l'architecte, il convient d'opérer cette sélection de ceux qui sont jugés comme clés ou critiques.

Nous dirons qu'un point particulier est un point clé s'il représente un sujet d'importance prépondérante pour une ou plusieurs parties prenantes, et qu'il est dimensionnant dans la manière de façonner l'architecture. Atteindre un tel point clé confère à la solution son prestige, cela devient une source prééminente de création de valeur. *Contrairement*, ne pas obtenir ce point clé diminuerait la valeur de la solution et entamerait son attractivité.

Un point particulier est un point critique si sa prise en compte est liée à un risque significatif, ce qui se traduit par des difficultés potentielles dans le cycle de vie d'ingénierie de la solution. De tels points nécessitent que nous y prêtions une attention particulière, sans pour autant que leur achèvement apporte nécessairement une valeur perceptible. En revanche, les négliger se traduirait immanquablement par une mise en danger du bon achèvement de la solution, et donc détruirait *de facto* de la valeur.

À partir des attentes principales, des contraintes majoritaires, des points clés et des points critiques, il convient de distinguer ceux qui ont les ramifications les plus importantes dans l'élaboration de l'architecture. Ceux-là formeront l'ensemble des moteurs de la conception architecturale, c.-à-d. l'ensemble minimal des fonctionnalités, qualités, ou objectifs qui façonnent essentiellement l'architecture d'une solution. Ces moteurs serviront plus tard à l'évaluation d'alternatives architecturales, et alimenteront l'analyse des alternatives et la prise de décision. Il existe diverses techniques pour éliciter les moteurs de la conception architecturale, les principales étant :

- l'approche ATAM (*Architecture Trade-off Analysis Method*) [KKC00] suggère le recours à des arborescences d'utilité (*utility trees*), en partant d'une utilité (par exemple, la sécurité), puis de les raffiner en scénarii, qui sont ensuite hiérarchisés ;
- l'approche MFESA (*Method Framework for Engineering System Architecture*) [FCF⁺08] dédie une tâche intégralement sur le sujet, la tâche 2 « *Identify the Architectural Drivers* ».

Nous donnons ici à titre indicatif quelques pistes de ce que pourraient être ces moteurs de la conception architecturale :

- bien sûr, les attentes principales, les contraintes majoritaires, les points clés et les points critiques ;
- l'objectif et le cadre de la démarche architecturale : au sein d'une réponse à appel d'offres, au travers d'un effort de R&T, dans l'élaboration d'une ligne de produits. . .
- les attributs de qualité, appelés aussi propriétés du cycle de vie ou *ilities* dans la littérature anglo-saxonne : ce sont probablement les moteurs de la conception architecturale les plus significatifs, voire les plus critiques. Attention, ces attributs sont souvent contradictoires ou antagonistes entre eux. Il ressort que bien choisir une hiérarchie appropriée d'*ilities*, en continuité avec les attentes principales, les contraintes majoritaires, les points clés et les points critiques, est d'une importance déterminante pour diriger l'élaboration de la solution architecturale de la manière la plus pertinente possible ;
- certaines préoccupations architecturales ou points d'attention particuliers (par exemple, le vide spatial, et donc l'absence de convection rend les aspects thermiques critiques dans l'architecture de systèmes spatiaux).

Un des enjeux sera de trier les décisions pour ne garder que les décisions architecturales et laisser les décisions d'ingénierie pour plus tard. Une décision architecturale amène à des architectures radicalement différentes l'une de l'autre suivant le choix effectué, et oriente la solution architecturale dans une direction particulière. Afin de distinguer une décision architecturale d'une décision d'ingénierie E. Crawley, B. Cameron et D. Selva [CCS15] proposent les tests suivants :

Test de sensibilité : Est-ce que la décision influe fortement les moteurs de conception architecturale ?

Test de connectivité : Si cette décision est remise en cause, entraîne-t-elle une reprise substantielle ?
Peut-on effectuer cette décision en aval sans se soucier d'autres décisions ?

Les décisions hautement sensibles et fortement connectées seront réputées être des décisions architecturales.

R. Malan et D. Bredemeyer [MB06] donnent des clés complémentaires pour trier les décisions architecturales :

Test de la portée : Est-ce que la décision peut être instruite avec une perspective locale, réduite ou au contraire nécessite d'adopter un cadre élargi et une perspective systémique ?

Test de l'importance de l'impact : La prise de décision aura-t-elle un impact réduit ou local (n'affectant que peu de parties prenantes ou n'affectant pas d'intérêts ou de préoccupations majeurs) ou au contraire un fort impact (affectant des parties prenantes importantes vis-à-vis de préoccupations ou intérêts majeurs) ? En d'autres termes la décision est-elle liée à des attentes principales, des contraintes majoritaires, des points clés ou des points critiques ?

Les décisions architecturales ne sont pas un simple ensemble à *plat*, mais elles sont interconnectées. Il est important de voir ces connexions d'une part entre décisions architecturales (quelles décisions influencent quelles autres décisions, et y a-t-il un lien de causalité entre ces décisions ?), d'autre part entre les décisions architecturales et les moteurs de conception (quelles décisions affectent quels moteurs de conception, et si possible avec quelle sensibilité ?).

2.3.2 Les modes de raisonnement de l'architecte

Prendre ou tout du moins instruire des décisions architecturales en se distinguant de l'ingénierie peut trouver sa justification dans l'adoption de modes de raisonnement propres.

Dans la suite du document le substantif architecte désignera indistinctement soit l'architecte lui-même, c.-à-d. la personne, soit l'équipe en charge de faire le travail d'architecture. Dit autrement, l'architecte signifiera dans ce manuscrit un rôle qui pourra être porté, suivant les circonstances, soit par une personne, soit par un groupe de personne.

La pensée système (*Systems Thinking*)

Née aux États-Unis au début des années 50, connue et pratiquée en France depuis les années 70, l'approche systémique s'oppose à l'approche analytique (qui atomise en éléments simples et recherche des séries causales indépendantes), en essayant de rendre compte des différents ensembles organisés présents dans le monde sans les dissocier.

L'approche systémique peut être employée dans presque tous les domaines de la connaissance, et a déjà donné lieu à de nombreuses applications, aussi bien en biologie, en écologie, en économie, dans les thérapies familiales, le management des entreprises, l'urbanisme, l'aménagement du territoire, etc. Elle repose sur l'appréhension concrète d'un certain nombre de concepts tels que : système, interaction, rétroaction, régulation, organisation, finalité, vision globale, évolution, etc.

Soit un ensemble et ses composants. Alors, l'ensemble possède des propriétés qui proviennent de l'assemblage lui-même ; il s'ensuit trois conséquences. S'il se défait, les propriétés disparaîtront. Si l'organisation change, les propriétés changeront (bien que les constituants soient les mêmes). L'ensemble ne doit pas être décomposé, car alors il perd ses propriétés. Certaines des propriétés des composants sont attribuables aux relations qu'ils entretiennent avec les autres au sein de l'ensemble. Elles ne peuvent donc être connues si nous les séparons de l'entité. L'ensemble peut et doit être considéré pour lui-même, indépendamment de ses constituants.

Ainsi, suivant la formule d'Aristote, « *le tout est plus que la somme des parties* ». Ceci est d'autant plus important dans l'architecture d'un système et notamment quand nous nous intéressons au sacrosaint principe de décomposition et de recombinaison permettant a priori de simplifier une problématique d'ingénierie : en effet lors de la recombinaison, c.-à-d. du processus d'intégration, vont apparaître des propriétés qui n'auraient pas nécessairement été vues au niveau des niveaux en train d'être intégrés.

Cependant, la pensée systémique nous pousse aussi à voir que « *le tout est moins que la somme des parties* » : en effet, les différents composants ont un ensemble de comportements admissibles auxquels ils n'ont plus nécessairement accès lorsqu'ils sont intégrés ensemble, justement du fait que des interconnexions sont créées entre les composants, ce qui diminue certains de leurs degrés de liberté.

En fait la pensée systémique revient à se poser systématiquement la question de ce qu'est un système, son extérieur, sa frontière, les interactions entre système et extérieur, les interactions au sein du système, la finalité du système.

La pensée critique (*Critical Thinking*)

La pensée critique est la capacité à penser clairement et rationnellement concernant les actes et les croyances, afin de pouvoir s'engager dans une réflexion indépendante. A priori cela permet de comprendre les connexions logiques entre idées ; d'identifier, de construire et d'évaluer des arguments ; de détecter des incohérences et des erreurs fréquentes dans des raisonnements ; de résoudre des problèmes de manière systématique ; d'identifier l'adéquation et l'importance de différentes idées ; de réfléchir sur la justification des croyances et des valeurs.

Un certain nombre de compétences sont mises en œuvre à cette occasion :

l'analyse	capacité à examiner quelque chose, à comprendre ce que cela signifie ou représente,
la clarification	capacité à redonner une information, mais aussi à la reformuler de manière compréhensible facilement,
le jugement	capacité à établir la validité d'une idée,
l'explication	capacité à formuler clairement une information tout en y ajoutant sa propre perspective,
l'inférence	capacité à tirer des conclusions à partir de l'information fournie, qui peut être potentiellement limitée,
l'interprétation	capacité à comprendre l'information, ainsi qu'à communiquer la signification de cette information dans un format clair pour l'auditoire,
l'objectivité	capacité à ne pas déployer de biais lors d'un jugement,
la résolution de problème	capacité à analyser un problème, trouver une solution, la mettre en $\frac{1}{2}$ œuvre, en mesurer l'efficacité.

La capacité à avoir une pensée critique est fondamentale pour un agent rationnel, d'où l'importance de se pencher sur les différentes formes de raisonnement. Celles-ci ont été réparties par le célèbre sémioticien et philosophe américain Charles Sanders Peirce [Pei58] en trois classes : la déduction, l'induction et l'abduction.

La déduction est le raisonnement qui consiste à tirer, à partir d'une ou de plusieurs propositions, une autre proposition qui en est la conséquence nécessaire ; c'est donc extraire du particulier à partir de l'universel. Ce raisonnement est utilisé dans la pratique mathématique de la preuve.

L'induction est un type de raisonnement qui consiste à généraliser des cas particuliers : à partir d'un phénomène observé de manière répétitive, une loi générale va être proposée, sans vérifier tous les exemples ; c'est donc extraire l'universel du particulier. En mathématiques, l'induction est utilisée pour faire émerger une conjecture après avoir traité des exemples.

L'abduction est un processus permettant d'expliquer un phénomène ou une observation à partir de certains faits, événements ou lois. Il s'agit de former une conclusion à partir de l'information qui est connue. L'exemple typique est ce que fait un détective pour identifier le criminel, en mettant ensemble les divers indices qu'il peut recueillir sur une scène de crime.

Pour résumer : la déduction prouve que quelque chose doit être, l'induction montre que quelque chose est effectivement, l'abduction suggère que quelque chose pourrait être.

La méthode du détective

Charles Sanders Peirce installe l'abduction comme étant le moteur unique d'une démarche créative [Pei58]. Sans être aussi catégorique, posons que cette mécanique se doit d'être l'inférence privilégiée dans une démarche de conception architecturale, qui se veut être une démarche mêlant perception du temps présent et projection de futurs possibles et plausibles, et non une démarche de résolution de problème.

Umberto Eco nous montre que ce mode de raisonnement tient lieu de méthode pour tout détective qui se respecte. Dans [Eco92], il analyse les enquêtes du grand Sherlock Holmes et nous révèle qu'il procède par abduction, et non par déduction comme nous le pensons communément. À partir d'un certain nombre d'indices (partiels, et dont la cohérence n'est pas forcément évidente), nous venons extraire un ou des principes ou histoires explicatives parmi d'autres. Nous retenons celui ou ceux qui sont les *meilleures explications possibles*. Ces explications sont certes valides, mais restent probables, donc non certaines. La confrontation avec le réel permettra d'assurer ou non son caractère de vérité. Le détective, en présence d'indices, de traces, fait appel à son imagination pour bâtir des scénarios hypothétiques, convoquant ainsi imagination, créativité et intuition. En perdant en rigueur (hors de la logique classique, en se fondant sur des probables), elle gagne en ouverture en proposant des interprétations, plutôt que des théorèmes.

Encart 2.1

[Qu'est-ce qu'une *bonne* abduction ?]

Peirce décrit les caractéristiques que doit avoir une hypothèse issue d'une démarche abductive afin d'être véritablement créatrice :

- un pouvoir explicatif ;
- une capacité à pouvoir être éprouvé ;
- un caractère économe du test : pouvoir tester un champ large avec un test simple ;
- un caractère non bloquant : permettre la poursuite de réflexions ultérieures.

Eco reprendra les travaux de Peirce pour proposer quatre niveaux de performance créatrice :

- l'abduction sous-codée : le résultat produit reste très hypothétique et très incertain ;
- l'abduction sur-codée : le résultat est de l'ordre de l'évidence.
- l'abduction créatrice : ici il y a eu une invention de réalisée, le résultat représente donc une forme de progrès ;
- la méta-abduction : successive de l'abduction créatrice, consiste à décider si le nouvel univers ainsi créé correspond à l'univers sensible (il en est une explication).

L'originalité dans la démarche architecturale est qu'il s'agit d'une démarche abductive que nous pouvons qualifier de prospective ou de projective (à rapprocher de la démarche d'un écrivain, d'un scénariste, d'un compositeur...), alors que dans la méthode du détective elle est rétrospective (reconstruction du passé par abduction).

2.3.3 Complexité et nécessité de l'architecture

« Est-il toujours indispensable de distinguer l'architecture de l'ingénierie et est-il toujours nécessaire de faire de l'architecture lorsque dans un contexte d'ingénierie de systèmes ? » Cette question mérite que nous y prêtions attention, afin de légitimer la particularisation et la mise en exergue de l'architecture. Une piste que nous allons exploiter est celle de la complexité, en partant de l'idée naïve que « plus c'est complexe, plus l'architecture devient indispensable ».

Creusons plus formellement cette idée.

Étymologiquement, *complexe* s'oppose à *compliqué* : le premier a pour racine « *ple* » signifiant « *tresser* » ; le second a pour racine « *pli* » signifiant « *plier* ». L'idée clé est donc celle d'enchevêtrement, d'imbrication des relations au sein d'un objet complexe.

Un système compliqué [CL09] est donc potentiellement constitué d'un nombre élevé de composants, mais fondamentalement il n'introduit rien d'autre que cette cardinalité. Au contraire le système complexe sera remarquable par : la forte hétérogénéité des composants (mécaniques, électroniques, voire opérateurs humains ou organisations sociotechniques) ; les boucles de rétroaction pouvant exister entre ces composants ; l'existence de différentes échelles de temps au sein de son évolution (coexistence de régimes rapides et lents) ; une frontière pas toujours aisée à poser de manière définitive entre ce qui va caractériser le système d'intérêt et ce qui peut être caractérisé comme l'environnement ou l'exosystème ; des échanges avec rétroactions potentielles au niveau de cette frontière, etc.

Afin de mieux appréhender les différentes classes de systèmes en vue de leur architecture, un cadre particulier a été défini à partir de 1999 par Dave Snowden, chercheur travaillant à l'époque chez IBM Global Services : le cadre Cynefin [Sno00]. Cynefin (/kʌnɪvɪn/) est un mot gallois difficilement traduisible. Son sens commun est *habitat*, *repaire*, *résidence* en tant que nom et *familier*, *usuel*, *habituel*, *ordinaire* en tant qu'adjectif. Il signifie un endroit avec des appartenances multiples, mettant en exergue que nous avons tous des racines variées qui nous influencent, mais sans que nous en ayons véritablement conscience. David Snowden choisit ce terme pour marquer le caractère à la fois et incertain évolutif des systèmes complexes.

Le cadre Cynefin est un cadre *créateur de sens* (*sense-making*). Par opposition aux modèles de catégorisation, bâtis antérieurement aux données à traiter permettant ultérieurement de ranger les données dans une catégorie ou l'autre, les modèles de *sense-making* tentent de donner du sens à des expériences, donc à des données collectées.

Le cadre est basé sur quatre classes de systèmes (simple, compliqué, complexe, chaotique), auxquelles se rajoute une dernière classe pour les systèmes que nous n'avons pu mettre dans aucune des classes précédentes, appelée désordre (cf. tableau 2.3 page suivante).

David Snowden explique également les transitions (et risques associés) d'un domaine à l'autre. En particulier il pointe le *risque* de tomber dans le chaos quand on se *réfugie* dans la simplicité. Identifier une situation comme simple pousse à se déplacer vers sa zone de confort, qui se situe à la frontière avec le chaotique. La paresse qui consiste à simplifier ce qui ne l'est pas aboutit malheureusement à tomber dans le chaos, c'est-à-dire en situation de crise. David Snowden préconise donc de rester dans une zone située entre *compliqué* et *complexe*, et de tomber dans la simplicité que très épisodiquement, et de manière assumée (non par paresse), les systèmes *simples* étant vulnérables aux changements rapides et généralement avec des conséquences catastrophiques.

TABLE 2.3: Domaines du cadre Cynefin

	Causes et Effets	Approche	Pratiques
<i>Simple</i> (ou plutôt Évident ou Connu)	Les relations causes → effets existent, sont connues et répétables	« L'évidence » de ces relations pousse à une approche de type : Observer - Catégoriser - Répondre (<i>Sense - Categorise - Respond, S-C-R</i>)	<i>Meilleures Pratiques (Best Practices)</i>
<i>Compliqué</i> (ou Connaissable)	Les relations causes → effets existent, mais ne sont pas évidentes. Il est possible de bâtir un graphe (orienté et acyclique) de relations causales. Cela peut requérir l'intervention d'experts pour se faire.	La nécessaire découverte de ce graphe de relations amène à une approche du type : Observer - Analyser - Répondre (<i>Sense - Analyse - Respond, S-A-R</i>)	<i>Bonnes Pratiques (Good Practices)</i> . Se distingue des meilleures pratiques dans le sens où plusieurs pratiques peuvent convenir et qu'il peut être risqué de se limiter à l'application d'une seule (comme étant une <i>loi universelle</i>)
<i>Complexe</i> (ou rétrospectivement cohérent)	Causes et effets ne sont plus simplement distinguables (limite de l'approche analytique) et apparaissent des boucles causales ou de rétroaction (des causes agissent sur des effets qui eux-mêmes rétroagissent sur les causes), provoquant des comportements dits émergents.	Expérimenter devient l'entame la plus probante, y compris pour comprendre le problème lui-même. L'approche est alors : Expérimenter - Observer - Répondre (<i>Probe - Sense - Respond, P-S-R</i>)	Pratiques émergentes (découvertes par l'approche, et souvent obtenues par la combinaison ou composition de pratiques existantes)
<i>Chaotique</i> (ou incohérent)	Les relations entre causes et effets ne peuvent plus être établies.	Comme son nom le suggère, les choses ont tendance à <i>aller de travers</i> , et du coup l'approche est de tenter de contenir, stabiliser, et par touches successives : Agir - Observer - Répondre (<i>Act - Sense - Respond, A-S-R</i>)	Pratiques nouvelles et inédites.
<i>Désordonné</i>	Nous ne savons pas où nous sommes, et donc ne savons quel type de causalité existe. . .	Bouger vers un des quatre domaines, celui qui est approprié à la situation	

Ce modèle est en premier lieu un outil d'analyse, mais aussi un outil de prise de décision, permettant d'orienter le choix d'une méthodologie adaptée au besoin et proposant une approche quant à la prise de décision en fonction de la catégorie des situations rencontrées. Cette catégorisation repose sur une façon d'appréhender l'ordre (ou le désordre) de la situation, et par la suite de le comprendre et d'avoir la bonne attitude pour le maîtriser. En ce sens, nous ne sommes pas si éloigné de la notion d'architecture, comme système d'organisation et de compréhension d'éléments entre eux. Architecturer, n'est-ce pas, dans une certaine mesure ordonner des éléments, ou à défaut rendre intelligible, révéler, assigner une forme d'ordre à un ensemble d'éléments. Cela légitime de prendre Cynefin comme point de départ pour essayer de situer l'architecture, et en décliner des postures ou approches possibles vis-à-vis des situations rencontrées. (Qu'avons-nous à architecturer ? Comment pouvons-nous nous y prendre ?).

Un système simple est tel que les relations entre cause et effet existent, sont prévisibles, se répètent, sont connues. La prise de décision se fera plutôt sur le mode : percevoir-catégoriser-répondre. C'est le domaine où nous pouvons appliquer en confiance les savoir-faire, les meilleures pratiques, les procédures éprouvées. Ce domaine ne requiert donc pas *a priori* d'architecture, ne nécessitant pas de création ou de démarche particulières.

Un système compliqué est également caractérisé par des relations entre cause et effet, mais qui ne sont pas toujours connues, et qui nécessiteront donc l'intervention d'experts. La prise de décision suit le mode : percevoir-analyser-répondre. C'est le domaine privilégié des ingénieurs, élaborant des bonnes pratiques, recherchant éventuellement plusieurs solutions pour un même problème. L'approche développée dans cette classe de système est celle des intelligences artificielles comme Deep Blue face au jeu d'échecs. Bref un système compliqué ne requiert pas nécessairement une architecture. Dans le cas de système très compliqué (cardinalité des relations, des constituants, des interactions élevées et plus maîtrisables directement par l'homme et sa cognition) une abstraction sous forme d'une architecture intelligible rendra sans doute le travail d'ingénierie plus performant. Nous sommes sur la limite de nécessité de la dissociation et la complémentarité entre ingénierie et architecture.

Un système complexe est tel que les relations entre cause et effet ne sont connues qu'après-coup, avec des résultats émergents non prévisibles. La prise de décision se fait suivant le mode : sonder-percevoir-répondre. Cela débouche sur de nouvelles manières de résoudre les problèmes, éventuellement en combinant des solutions existantes. Des exemples de tels systèmes sont les marchés financiers, les écosystèmes, les champs de bataille. Avancer dans cet inconnu ne pourra se faire avec des modes de raisonnement *classiques* de l'ingénieur, et le recours au travail d'un architecte (produisant une architecture) deviendra un facteur indispensable de maîtrise du système.

Un système chaotique est un système dans lequel aucune relation entre cause et effet ne peut être déterminée, et le mode de prise de décision est alors : agir-percevoir-répondre. L'idée sous-jacente est d'agir pour essayer d'établir un peu d'ordre, de percevoir des régimes locaux de stabilité, de répondre pour tenter de passer d'une situation chaotique à une situation complexe (ou simple, mais cela ne s'avère pas souvent le cas!). Il en découlera des manières nouvelles et inédites de résoudre les problèmes liés à de tels systèmes. Le recours à un travail d'architecture peut alors s'avérer utile suivant les circonstances.

Une classe appelée désordre, sorte de ramasse-miettes, couvre les systèmes où il n'y a aucune information sur leur type, et l'approche reste alors intuitive en se fiant à ses préférences ou son expérience pour prendre des décisions. Il va de soi que cette classe n'a été rajoutée que pour proposer une exhaustivité du cadre Cynefin, mais qu'elle n'est pas opératoire.

Complétons cette analyse préliminaire en confrontant les trois catégories simple, compliquée et complexe à l'épreuve du réel. Nous emprunterons au domaine de la construction et de l'architecture pour mener cette confrontation en prélevant trois exemples caractéristiques de chacune des catégories.

Une situation simple : La niche à chien

La conception d'une niche à chien repose sur le concept de l'analogie (c'est une maison *en miniature*). Elle requiert peu de compétences, et l'idée, l'orientation de départ (une maison en miniature) suffit pour accomplir concrètement la réalisation tangible. Un plan peut s'avérer utile, mais il est envisageable de s'en passer sans conduire à une non-maîtrise ou à une catastrophe. Des pratiques courantes et connues permettent de mener à bien la réalisation sans mobiliser d'effort spécifique pour identifier ces pratiques. Nous sommes bien dans le domaine des *meilleures pratiques* du domaine simple de Cynefin où une architecture n'est pas indispensable.

Une situation compliquée : La maison individuelle

Une longue tradition et un savoir-faire éprouvé permettent d'aborder la conception de maison individuelle de manière sûre. En revanche, il n'y a pas de réponse unique, et chaque maison requiert potentiellement d'analyser certains points particuliers pour choisir la *bonne* façon de procéder, souvent précédée d'activités de saisie ou de création de connaissance (quelle est la nature du terrain et de son sous-sol ? Que dit le Plan Local d'Urbanisme sur les contraintes à respecter ? Quelles sont les servitudes qui grèvent la parcelle foncière ? etc.). À ce niveau-là, nous ne pouvons pas nous passer, d'explorer différentes pistes, d'établir et partager des plans, intégrer un certain nombre de contraintes (réglementaires, environnementales, budgétaires, etc.), et de faire collaborer des métiers et des compétences diverses. L'approche « *Observer - Analyser - Répondre* » et la mise en œuvre de *Bonnes Pratiques* adressent cette typologie de problèmes d'architecture civile.

En revanche, le recours à un architecte est-il nécessaire ? Deux facteurs entrent en jeu *a minima* :

- le cadre réglementaire ;
En France, la loi² oblige à recourir à un architecte pour une surface au sol supérieure à 150 m².
- le niveau de personnalisation souhaité.
Si le futur propriétaire se contente d'une maison *sur catalogue* comme le proposent certains constructeurs, et qu'elle présente une surface au sol inférieure à 150 m², il pourra déposer un permis de construire sans forcément recourir à un architecte. En revanche, quelle que soit la surface, s'il souhaite une maison bien particulière et personnalisée, qui donc nécessite une conception adaptée et à façon, le recours à un architecte sera indispensable. D'ailleurs, dans le langage commun, pour désigner une maison individuelle peu commune ou particulière, on parle d'une maison d'architecte !

Une situation complexe : La Fondation Louis Vuitton

La fondation Louis Vuitton confiée à l'architecte Frank Gehry est un exemple flagrant d'un projet unique ayant nécessité de découvrir et faire émerger des idées, des pratiques pour élaborer l'architecture. Le concept même de l'architecture relève d'un processus

². Le décret n° 2016-1738 du 14 décembre 2016 [dlcedlc16] relatif à des dispenses de recours à un architecte est paru au Journal officiel du 16 décembre. Il est pris en application de l'article 82 de la Loi sur la liberté de création, l'architecture et le patrimoine, qui a été promulguée le 7 juillet 2016. Il fixe à 150 m² de surface de plancher le seuil au-delà duquel les personnes physiques sont tenues de recourir à un architecte lorsqu'elles édifient ou modifient des constructions, à l'exception des constructions à usage agricole (il modifie l'article R. 431-2 du code de l'urbanisme). Ce nouveau seuil s'applique aux demandes de permis de construire déposées à compter du 1^{er} mars 2017.

de création plutôt inédit, contrairement à la conception de maisons individuelles qui puise dans une base de solutions préexistantes et connues (*pattern*, [Ale77]) et les compose habilement. L'idée, le concept de départ tient entre autres :

- du voilier qui est le symbole de Louis Vuitton ;
- de la légèreté et la transparence du verre inspirée de monuments du XIXe siècle ;
- de la détestation des lignes droites et de la perpendicularité de Frank Gehry [Cou14], de son amour pour les poissons et la mer.

L'expérience préalable permettant de sentir avant de répondre (P-S-R) se traduit par une approche à la fois *conventionnelle*³ dans le déroulé, et inédite dans les réponses apportées qui repoussent les limites de l'architecture.

En particulier Frank Gehry exprime ses premières élucubrations au travers d'esquisses à la technique très personnelle (il ne lève pas son stylo et donc produit un trait continu), ponctuée son travail de nombreuses maquettes [CR14]. La convergence de son processus d'exploration se conclut par la production d'une maquette à l'échelle 1 :50 ("1:50 confirmation model") qui permet une validation de la part des parties prenantes principales (en particulier le client) et qui marque la transition entre représentations physiques et modèles numériques.

Architecte de l'ensemble, garant de la cohérence, de l'intégrité globale, Franck Gehry est alors le capitaine d'une équipe qui fournit un travail collaboratif (environ 120 personnes travaillent autour de lui sur le projet de la Fondation Louis Vuitton)

De ce parcours à travers quelques exemples, nous pouvons induire que la nature de la conception architecturale des systèmes prend toute son ampleur dans le domaine complexe, et potentiellement contribue ou aide à aborder le domaine compliqué de Cynefin. Ce qui implique probablement que l'entame de toute conception architecturale est d'abord de reconnaître dans quel domaine nous nous situons : compliqué ou complexe ?

Simple	Compliqué	Complexe	Chaotique
Architecture Superflue	Apport conjoncturel d'une démarche architecturale	Nécessité d'une démarche architecturale	Démarche architecturale peut aider suivant les cas

TABLE 2.4: Complexité et nécessité de l'architecture

La limite entre les deux marque d'une certaine manière la limite de la rationalité pour la prise de décision. Dans le domaine de la complication, la causalité peut être déterminée, ce qui permet de rationaliser la prise de décision, alors que dans le domaine de la complexité, la perte de déterminisme causal entraîne *de facto* de nouvelles postures.

Dans sa brochure du Réseau *Architecture et Complexité* (<http://www.architecture-et-complexite.be>), Damien Claeys dresse un constat quant à la non-prise en compte de la complexité dans la démarche architecturale.

3. Face à une situation complexe, Frank Gehry adopte bel et bien l'approche que David Snowden a répertoriée dans son cadre : il commence par expérimenter, produit des modèles qui lui permettent de *sentir* avant de converger vers une bonne réponse à apporter.

« En tant que système particulier de mise en ordre de la réalité, le domaine de l'architecture pose question pour plusieurs raisons. D'abord chaque concepteur est livré à la multiplicité des clés de lecture culturelles le situant par rapport au monde. Il doit composer avec la distance inéluctable entre le monde de ses perceptions et celui de ses conceptions personnelles. Ensuite, les acteurs et les facteurs pris en compte dans les processus de conception et de construction de l'édifice se multiplient chaque jour et révèlent un peu plus l'incontournable complexité du réel. Lors de tout processus de conception architecturale, l'un des défis majeurs de notre époque est d'appréhender et surtout de gérer la complexité des modes de représentation, des moyens de mise en œuvre, des jeux d'acteurs, des systèmes institutionnels et politiques. . . Le concepteur – noyé par le flux ininterrompu de percepts ambigus – doit constamment réélaborer une méthode de conception architecturale pour ne pas céder à l'incertitude croissante de son mode d'action. La tradition analytique occidentale, héritée du cartésianisme, doit être complétée de cadres de pensée fondés sur d'autres représentations du réel, tels que la pensée complexe, le constructivisme ou la systémique. Ces méthodes de pensée ont l'avantage d'intégrer la complexité du cosmos, des organismes vivants, des sociétés humaines et des artefacts. Il est dorénavant possible d'élaborer des outils théoriques et pratiques d'aide à la conception architecturale qui permettent de penser dans l'action avec lucidité et en pleine conscience de l'interdépendance des phénomènes. Pour aider le concepteur, il est nécessaire de revisiter la nature complexe des outils théoriques (méthodes de pensées), ainsi que les outils pratiques (plans, maquettes, schémas, diagrammes. . .) de la projection, et défendre leurs qualités de médiations entre les acteurs et les facteurs de la conception. »

La conception architecturale des systèmes, comme son aînée dans le domaine de l'architecture *tout court* doit prendre conscience qu'elle a à affronter la complexité avec les démarches et les postures appropriées. Cette épiphanie dans le domaine de l'ingénierie des systèmes n'est pas encore survenue.

2.4 Viser un paradigme de la conception architecturale

2.4.1 Des défis

La nécessité de particulariser l'architecture de l'ingénierie dans le cas de systèmes artificiels complexes, et d'adopter une démarche de conception architecturale avec les modes de raisonnements appropriés apparaît plus notoire et plus motivée. En revanche la jeunesse de ce domaine, non encore une discipline, pose un certain nombre de défis pour répondre à ce besoin de manière opérante. Balayons-en les principaux.

Fondements	De par l'absence de fondements ontologique et épistémologique, l'architecture des systèmes artificiels complexes se saurait prétendre à être une discipline.
Faiblesse de la recherche	Comme évoqué par C. Eckert et M. Jankovic [EJ16], ce domaine ne bénéficie pas encore d'une recherche structurée ou de résultats scientifiques probants.
Manque de formation	À part l'institut CESAMES ⁴ offrant une formation professionnelle certifiée RNCP, il n'existe pas à notre connaissance de filières en France formant à l'architecture des systèmes complexes. Ceci est à mettre en contraste du domaine du bâtiment où depuis longtemps nous trouvons des formations et des parcours à la fois professionnels et universitaires séparés entre des écoles ou universités de génie civil et d'architecture.
Limitations des mécanismes de bases	Les démarches de conception architecturale semblent être toutes basées sur deux mécanismes fondamentaux, à savoir la décomposition et l'allocation. Restreignons l'examen de la pléthore de proposition de démarches à celles issues de notre pays. A.

4. <http://www.cesames.net/academy/>

Faisandier est sans doute un des premiers en France à avoir formalisé une démarche de conception architecturale [Fai13]. Elle est basée entre autres sur ces deux mécanismes principaux. D'autres lui ont emboîté le pas [Kro17, Voi18], et leurs démarches s'appuient également pour une grande part sur ces deux mécanismes.

Ces mécanismes pour opérants qu'ils soient semblent être limités, voire réducteurs pour affronter la complexité. Dès les années soixante-dix, C. Alexander dans un célèbre article, *A city is not a tree* [Ale66], évoque la côté réducteur de ces mécanismes. P. Vermaas fera plus tard une critique, montrant les difficultés sur le plan épistémologique à considérer les sous-fonctions comme des parties d'une fonction [Ver13], fragilisant ainsi les démarches de conception basée sur la soi-disant décomposition fonctionnelle.

Émergence

Du coup, bien souvent le concept d'émergence semble être passé par pertes et profits. La posture analytique qui considère que l'on peut découper les fonctions ou les comportements pour les répartir ou les allouer sur des constituants semble ignorer le principe d'émergence. Un comportement (ou une caractéristique) émergent étant le résultat des interactions et de l'organisation entre les constituants, et non pas seulement des comportements (ou caractéristiques) unitaires, la seule allocation ne peut tenir lieu de mécanisme pour viser les *bonnes* émergences de nos systèmes complexes. Ainsi c'est par la composition ou la structuration des éléments entre eux (une des définitions réduites de l'architecture, cf. section 2.2.1 page 55) que l'on obtient les comportements émergents.

Modes de raisonnement et postures inappropriés

Nous avons vu que les modes de raisonnement et les postures de l'architecture diffèrent de ceux de l'ingénierie. Nos architectes de systèmes complexes en herbe, majoritairement recrutés dans la population d'ingénieurs, y sont-ils prêts? D. Claeys, dans un article au nom évocateur, *Concevoir un projet d'architecture. Calmer les certitudes, gérer l'incertitude* [Cla15] nous interpelle de la sorte :

« Ce qui est découvert par le concepteur n'est pas le résultat de la simple application de savoirs disciplinaires, mais implique la capacité du concepteur à interpréter des traces et des signes. Il doit être capable de garder son esprit disponible pour respectivement percevoir, questionner, interpréter, comprendre et exploiter les données surprenantes et déroutantes qui font irruption dans le processus de projection. »

Pauvreté des représentations et des vues

La norme ISO/IEC/IEEE 42010:2011 [ISO11] pose la notion de vues et de points de vue permettant un large éventail de représentations. Son utilité est de servir de support à la représentation et au partage d'une préoccupation (*concern*) d'une ou plusieurs parties prenantes. La traduction dans les cadres standards (cadres d'architectures), dans les démarches et dans les systèmes de représentation (SysML, Arcadia, LML...) de cette idée est souvent très restreinte à quelques points de vue très particuliers. Parmi les points souvent oubliés, nous pouvons citer :

- les décisions prises, leur ordre causal, les justifications associées ;
- certaines caractéristiques particulières comme les menaces, les vulnérabilités, le coût. . . ;
- les alternatives, les incertitudes, les contradictions. . . ;
- la narration de l'élaboration de l'architecture ;
- la narration de la transformation envisagée pour passer de la situation courante à la ou les situations futures envisagées ;
- etc.

Incorporation du temps	En évoquant l'idée de narration précédemment, nous pouvons observer que la plupart des représentations, et la plupart des techniques ou méthodes dites de conception architecturale travaillent sur des instantanées, c.-à-d. une vue à un instant précis. Pour user d'une analogie, elles privilégient la photo au cinéma.
Invention et création	Beaucoup d'aspects concernant l'architecture sont identifiés et décrits dans les standards ou les documents de référence : l'architecture se doit d'être gérée, gouvernée, décrite, évaluée, etc. En revanche, la partie qui voudrait que l'on crée ou l'on invente une architecte est souvent négligée, d'autant plus qu'il s'agit d'imaginer des alternatives d'architectures : comment les générons-nous ? comment y accédons-nous ?
Peu de place à la perception	Les démarches actuelles se focalisent assez peu sur la partie perceptive de la situation courante et du monde <i>réel</i> (c.-à-d. celui dans lequel se déroulent les opérations et dans lequel se situent les parties prenantes, clients, usagers et autres, bénéficiaires potentiels des propositions architecturales).
Peu de place à l'architecte lui-même	La plupart des démarches tentent de rationaliser et de mécaniser la démarche architecturale, se plaçant dans le cas deux des caricatures de Jones [Jon69] (cf. section 1.3.1 page 18). Elles en oublient du coup la dépendance à l'architecte lui-même colorant toute proposition par sa présence même (ses connaissances, ses émotions, sa perception. . .) et influant et rétroagissant sur la démarche elle-même.

2.4.2 Des bénéfices

Pour avancer dans l'émancipation et le développement de l'architecture des systèmes complexes et affronter quelques-uns des défis déclarés, nous pensons qu'une des premières pierres à apporter à l'édifice consiste à proposer un paradigme de la conception architecturale.

Les bénéfices escomptés de cette contribution à l'architecture des systèmes artificiels complexes peuvent se synthétiser en des capacités, nouvelles ou accrues suivant les cas :

Capacité d'expliquer la démarche	Avoir un paradigme à sa disposition permet de le prendre comme base pour élaborer une explication de la démarche. La démarche de conception architecturale pouvait apparaître comme magique ou parfois obscure. Elle devrait être éclairée par le prisme du paradigme. Soit l'architecte, soit l'observateur de la démarche pourront faire connaître ce qui se passe ou ce qui s'est passé. Cette capacité nous semble d'importance, car souvent la narration ou l'explication de ce qui a été fait, c.-à-d. la manière d'aboutir au résultat est plus importante, ou au moins aussi importante, que le résultat lui-même.
Capacité d'explicitier la démarche	Si le paradigme propose une manière de décrire la conception architecturale, c.-à-d. un langage de la conception, nous pourrions formuler nettement, clairement et précisément la démarche à suivre ou la démarche suivie. Le bénéfice d'une telle capacité permet d'envisager une verbalisation ouvrant la voie à une capitalisation et un partage des expériences vécues, des enseignements tirés et des pratiques.
Capacité de transmettre des savoir-faire	De la capacité précédente découle une capacité accrue à pouvoir enseigner l'art de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes. D'une part en proposant le paradigme comme élément fondateur et de compréhension du domaine, d'autre part en pouvant par ce prisme-là étudier une jurisprudence.

Capacité à penser et spécifier des outils d'aide à la conception Si les outils de représentations des architectures sont relativement nombreux, trop peu se sont attaqués à l'aide à la conception architecturale de systèmes artificiels complexes. Le paradigme permettra de penser et concevoir ce que devrait fournir comme capacité un outil d'aide à la conception architecturale.

2.4.3 Une démarche

Nous pouvons qualifier la démarche adoptée pour aboutir à la proposition d'un paradigme de la conception architecturale, de réflexive et récursive.

Réflexive L'auteur de la présente thèse est lui-même un architecte. Il a exercé cette activité pendant environ vingt ans avant de démarrer cette thèse. Les travaux sont donc imprégnés de ses expériences et acquis. Une introspection et une prise de recul sur sa carrière, ses succès et ses erreurs ont grandement alimenté la réflexion. En ce sens, nous pouvons dire qu'il y a probablement une forme d'empirisme dans la démarche.

D'autre part depuis plus de quinze ans, l'auteur intervient en tant que vacataire dans des cycles de formation ingénieur (équivalent master 1 et 2), ou dans des formations professionnelles et s'est donc trouvé confronté à la problématique d'élaborer des contenus pédagogiques permettant l'acquisition de savoirs et de savoir-faire. La confrontation avec des apprenants a obligé à expliciter et expliquer les démarches, et à trouver des images marquantes et opérantes, bref à construire un paradigme de la conception architecturale qui puisse être enseigné.

Récursive Nous nous appliquerons à nous-même les modes de raisonnement et les postures mises en avant dans ce chapitre distinguant l'architecture de l'ingénierie. En cela, nous pouvons affirmer que nous allons architecturer, ou effectuer une conception architecturale du paradigme de la conception architecturale, en adoptant les modes de raisonnement de l'architecte mis en exergue : pensée système, pensée critique et abduction. À cela nous pouvons ajouter que la technique de créativité que nous favoriserons est celle de la bissociation, consistant à partir de deux idées de départ, de les associer afin d'en proposer une nouvelle. Cette technique aura l'avantage ici de ne pas proposer un paradigme *ex nihilo*, mais de s'appuyer et de démarrer sur des paradigmes existants.

Notons également que même si le domaine de l'architecture des systèmes complexes est encore en friche, la démarche de conception, voire la démarche de création n'est pas nouvelle dans nombre de domaines. Nous nous autoriserons donc le recours à l'analogie, la métaphore, et l'excursion dans d'autres domaines pour y puiser des sources d'inspirations, et des enseignements.

Cette démarche, qui laisse une plus grande place à l'abduction plutôt qu'à l'induction, ne saurait prétendre aboutir à une théorie scientifique, mais plutôt à une protoscience. Nous ne procéderons pas à la validation de cette proposition si ce n'est au travers d'un cas d'étude semi-fictif. Le cas d'étude proposé est celui de la sécurisation urbaine (*Safe City*). L'auteur a été architecte système sur des offres de sécurisation urbaine. Il est intervenu en particulier comme architecte système en chef sur un projet de sécurisation de la ville de Singapour. La confidentialité à laquelle l'auteur est assujéti ne lui permet pas d'utiliser des données réelles de ses projets passés, mais il est bien évidemment avantageux que sa connaissance du domaine transparaisse dans l'étude de cas.

Chapitre 3

Construire un paradigme de la conception architecturale

« Chercher la raison de toute forme car toute forme a sa raison. »
Eugène Viollet-le-Duc, préface des *Entretiens sur l'architecture*

La construction de notre paradigme procédera de deux bissociations¹ successives.

La première est construite à partir de deux paradigmes réputés dans le domaine de la conception de produits et systèmes : le FCF (Function-Concept-Form) d'E. Crawley, et le FBS (Function-Behaviour-Structure) de J. Gero. Nous en ferons une étude détaillée et critique. Cette première bissociation nous permettra d'établir une ontologie de base du domaine de la conception architecturale comprenant un certain nombre de concepts. L'identification d'une liste d'activités manipulant ces concepts accompagne la définition de l'ontologie.

Pour la seconde bissociation, nous nous décalons et allons puiser dans le domaine de la conception architecturale des édifices. Nous nous appuyons sur le travail de D. Claeys, dont la récente thèse propose un modèle systémique du processus de conception architecturale. Son paradigme va apporter de nouvelles dimensions significatives : incorporation du temps dans la démarche, prise en compte de l'architecte rétroagissant sur la démarche elle-même, structuration en différents espaces, étagement et agencement des processus de conception sur plusieurs niveaux, etc.

Sommaire

3.1	Le paradigme FCF d'E. Crawley	76
3.2	Le cadre FBS de J. Gero et ses extensions	85
3.3	Première bissociation : $FCF \oplus FBS$	97
3.4	Le paradigme (analytico)systémique de D. Claeys	107
3.5	Deuxième bissociation : $GC^3FB^2 \oplus$ Paradigme (analytico)systémique de D. Claeys	117
3.6	Synthèse	122

1. Terme introduit par Arthur Koestler [Koe64], pour nommer le processus intégratif de création, par composition ou fusion de deux éléments préexistants. Nous noterons cette opération avec le symbole \oplus .

3.1 Le paradigme FCF d'E. Crawley

Edward Crawley définit une architecture comme [Cra07] :



Définition 3.1

[Architecture (E. Crawley)]

“The embodiment of concept, and the allocation of physical/informational function to elements of form, and definition of interfaces among the elements and with the surrounding context.”

Intéressons-nous dans un premier temps à la première partie de la définition, que E. Crawley résume par “Architecture [...] consists of: Function, related by Concept, to Form” [Cra07] et qu’il représente de manière iconographique par la figure 3.1.

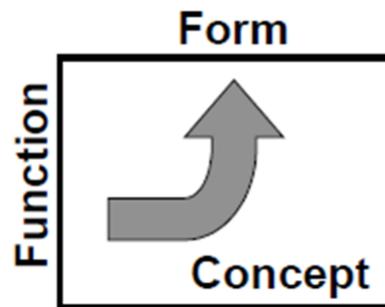


Figure 3.1: Le FCF d'E. Crawley, extrait de [Cra07]

Nous proposons de traduire cette définition par : « Une architecture est l’incarnation d’une fonction dans une forme au travers d’un concept ». Quelle première sémantique (informelle ici) pouvons-nous donner aux termes *fonction*, *concept* et *forme* ?

3.1.1 La fonction

Le moins que nous puissions dire est que le terme fonction est différemment connoté suivant les langages, suivant les disciplines, suivant les cadres dans lequel il est usité. Les travaux de Claudia Eckert [Eck13], comme ceux de Pieter Vermaas [Ver09] dénombrent une large variété de significations et de compréhensions de terme. “The concept of function can be given different meanings and the precise meaning it gets depends on the aim for which it is employed” [Ver09].

Un travail d’analyse datant de 2008 [EKV⁺08] recense pas moins de dix-huit approches différentes de modélisation fonctionnelle. Tenter ici d’en avoir une approche dénotationnelle, voire d’en proposer une ontologie serait pure gageure. Contentons-nous de balayer et proposer une voire des synthèses des principaux concepts que recouvre ce terme dans le domaine de l’ingénierie des systèmes.

Pour commencer, reconnaissons au moins deux acceptations intuitives de la notion de fonction :

À quoi cela sert ? Quelle est son utilité, son rôle ? Cette acceptation triviale est courante dans les domaines de l’organisation, de la sociologie. . . (la *fonction* d’une personne au sein d’une organisation).

Comment cela fonctionne ? Comment « *ça marche* » ? Comment cela remplit-il son rôle, comment cela exerce-t-il sa fonction, son travail ?

C. Eckert [Eck13] insiste sur cette distinction en exposant les différences de sens entre diverses langues. Par exemple, en allemand le verbe *funktionieren* est communément utilisé pour exprimer que quelque chose « *marche* » : »Der Lift funktioniert nicht« signifie l'ascenseur ne marche pas. En revanche, en anglais le verbe *function* renvoie à l'intention, au but : "The lift does not function", sera employé pour dire que l'ascenseur marche, mais qu'il ne délivre pas le résultat attendu (ne s'arrête pas au bon étage, par exemple). Notons également que les deux sens basiques sont éloignés de la signification mathématique du terme fonction qui traduit l'idée intuitive que deux choses sont reliées, ou que la donnée de l'une détermine l'autre.

Reprenons et détaillons ces différentes visions :

Vision mathématique D'une part, c'est un objet mathématique. Il formalise l'idée intuitive qu'une chose (l'argument de la fonction) en détermine une autre (la valeur de la fonction). Algébriquement parlant, une fonction c'est :

- deux ensembles : un ensemble de départ, appelé le Domaine de la fonction, un ensemble d'arrivée, appelé le Co-domaine ou l'Image ;
- une relation qui lie chaque élément du Domaine à un et un seul élément du Co-domaine.

Une fonction est donc un triplet : $f = (E, F, \{(x, f(x)) : x \in E\})$, avec E le domaine de la fonction, F le co-domaine, $\{(x, f(x)) : x \in E\}$ le graphe G de la fonction ($G \subset E \times F$). En théorie des ensembles, une *fonction* est synonyme d'*application*. Le terme de fonction est plus utilisé quand il s'agit de relier des grandeurs numériques, la fonction est alors la règle qui permet de déterminer la valeur d'un résultat par rapport à la valeur de variables d'entrée.

Nous pouvons y trouver un parallèle avec le paradigme entité-relation, couramment employé dans le domaine de l'informatique, ou dans celui de la modélisation sémantique ou ontologique d'un domaine. Ici la relation (le trait, dans la plupart des modalités graphiques) est la fonction.

Sa déclinaison dans le domaine de l'ingénierie revient à dire qu'un élément d'ingénierie est déterminé par l'application d'une fonction sur d'autres éléments. Par exemple la fiabilité d'un ensemble de deux éléments en redondance active (les deux fonctionnent en même temps) est une fonction de la fiabilité de ces éléments qui s'écrit : $R_s = f(R) = R^2 + 2R(1 - R)$ avec R la fiabilité sur une durée t d'un élément, et R_s la fiabilité résultante (notons au passage que cette fonction n'est valide que pour une organisation et un comportement particuliers du système, la redondance active. Elle capture dans une certaine mesure la *forme* du système, nous pourrions oser dire que cette fonction est dépendante de la forme du système).

Vision processus Le mot fonction est aussi souvent employé comme synonyme de transformation ou d'activité. Le recours à ce type d'artefact permet en les combinant d'explicitier le « *Comment ça marche ?* », « *Comment cela fonctionne ?* » Nous le retrouvons avec ce sens dans les expressions telles : Principe de fonctionnement (du système), Sûreté de fonctionnement... Dans ce cadre-là, nous pouvons définir une fonction comme une action :

- qui traite une (flux d')entrée,

- et génère une (flux de) *sortie*,
- et pour cela, consomme :
 - du *temps*,
 - et des *ressources*.

Les différentes grandes catégories d'action que nous considérons en ingénierie sont :

- les actions qui agissent sur la forme², bref des transformations ;
- les fonctions qui agissent sur le temps : entre la sortie et l'entrée, il n'y a pas de changement de forme, c.-à-d. de transformation, seulement une accumulation ou une dissipation (action de stockage et dé-stockage) ;
- les fonctions qui agissent sur l'espace : entre la sortie et l'entrée, il n'y a pas de changement de forme, c.-à-d. de transformation, seulement un déplacement ou un transfert.

Les différentes natures de flux d'entrée/sortie et de ressources, que nous rencontrons en ingénierie système sont :

- les flux de matière (qu'elle soit brute ou déjà transformée en produit artificiel) ;
- les flux d'énergie ;
- les flux d'information (quel que soit son niveau de synthèse, qu'il s'agisse de donnée brute non interprétée ou au contraire de son interprétation) ;
- les flux économiques, dont nous distinguerons les flux de biens ou de services (ce qui est nommé *flux réels* en économie) et les flux monétaires ou financiers ;
- les flux de personnes, recouvrant le cas particulier de transformations sur des individus (par exemple, une école *transforme* des élèves en leur apportant la maîtrise de connaissances et de savoir-faire, un hôpital *transforme* des patients en les soignant) ou des groupes de personnes (par exemple, un système de filtrage d'individus dans un poste-frontière), et où il n'est censé altérer ni la cardinalité ni l'identité numérique³.

La nature variée des flux, leur possible transmutation (seules quelques unes sont à considérer) permet de se rendre compte du caractère et de la couverture multidisciplinaire de l'ingénierie système.

2. Nous ne parlons pas ici de la forme au sens du paradigme FCF introduit, mais de la *forme* de l'entrée comparée à la *forme* de la sortie.

3. Nous rappelons ici que notre travail porte sur les systèmes artificiels n'altérant pas la nature de l'humain. Nous excluons donc les systèmes naturels, ainsi que certains systèmes artificiels, comme ceux basés sur du génie génétique, qui ont une capacité d'engendrer de nouveaux individus ou de modifier leur nature. En revanche, nous gardons dans notre champ les systèmes sociotechniques n'altérant pas cette cardinalité et l'identité des individus. En ce sens, l'exemple de l'hôpital prodiguant des soins dans le domaine de la traumatologie ou des pathologies classiques rentre bien dans ce cadre : que le patient entré à l'hôpital sorte guéri ou non, voire qu'il décède, le nombre et l'identité des patients ne sont pas altérés.

entrée → sortie ↓	matière, énergie	information	biens, services, argent	personnes
matière, énergie	sciences physiques	science automatique (observation)	sciences socio- économiques	
information	science automatique (actuation)	sciences de l'information	sciences socio- économiques	
biens, services, argent	sciences socio- économiques	sciences socio- économiques	sciences socio- économiques	
personnes				sciences humaines

TABLE 3.1: Nature et traitement des flux

Vision utilité Enfin, le mot fonction est aussi compris dans son sens usuel, c.-à-d. la fonction de *quelque chose* ou de *quelqu'un*, c'est son utilité (Que fait-il ? À quoi sert-il ?).

Efforçons-nous d'être plus précis. Pour comprendre la notion de fonction, P. Vermaas [Ver09], basé sur les travaux de D. Brown et L. Blessing [BB05], met en rapport cette notion avec quatre autres concepts, les cinq formant l'ensemble des concepts clés pour une description complète de produits technologiques⁴, à savoir : le but, les actions, les fonctions, le comportement et la structure.

Le but Il exprime ce que nous voulons obtenir comme effet, comme résultat en utilisant le produit. *Mutatis mutandis*, cela ressemble à la notion de capacité dans une approche système.

Les actions (ou les opérations) Elles sont ce que nous exécutons intentionnellement avec le produit (ou le système) pour atteindre le but recherché. Ces actions ne sont pas désordonnées, mais se doivent d'être organisées sous forme d'un plan. Cela est à rapprocher des notions de Concept d'Emploi (*Concept of Employment*) ou de Concept d'Utilisation (*Concept of Use*) dans une approche système.

Les fonctions Quand le produit est sollicité dans son contexte (ou dans un contexte particulier), que fait-il ?, quel rôle joue-t-il ?. L'ensemble de ces rôles joués par le produit lorsqu'il est sollicité constitue ses fonctions.

Le comportement Il décrit la manière dont le produit évolue (ses caractéristiques, ses performances, ses variables...) dans ses contextes quand il est sollicité par l'extérieur... ou pas (il peut y avoir un comportement au repos).

La structure Elle représente la description des éléments et leurs différents domaines, avec leur configuration spatio-temporelle (comment sont-ils reliés, comment cela évolue dans le temps).

4. Le travail de P. Vermaas est ici restreint à la conception des produits technologiques, mais nous pouvons aisément extrapoler à la conception de systèmes, les notions introduites, en leur donnant un sens large, restant pertinente y compris à l'échelle d'un système.

Cette mise en situation de la notion de fonction dans un contexte élargi nous permet de mieux cerner sa nature, en renforçant et développant la partition intuitive introduite au début de cette section entre le « À quoi ça sert ? » et le « Comment ça marche ? ». La fonction apparaît ici comme une charnière entre une vision intentionnelle et une vision structurelle et physique de l'objet d'étude. Les cinq concepts clés introduits ci-devant montrent un ordre séquentiel allant de l'abstrait vers le concret, de l'intentionnel vers le structurel ou le physique. Ce séquençage des concepts suggère une structure conceptuelle en couches des modèles de description de l'architecture d'un produit, ainsi qu'un véritable travail de transformation d'un niveau vers l'autre.

Dans ce modèle conceptuel, la position du concept de fonction de par sa proximité avec les actions et le comportement tend à introduire une confusion ou une interprétation double de la notion de fonction. Cette duplicité provient de la vision et de la perspective que nous adoptons sur l'objet d'étude (que cela soit un produit, ou un système).

Si nous mettons l'objet d'étude dans son contexte opérationnel, et le considérons comme une boîte noire, voire comme un objet encore virtuel et non incarné, la notion de fonction s'assimilera avec l'effet désiré sur le contexte. Les différents vocables rencontrés pour qualifier ces fonctions sont assez larges. Nous trouverons des dénominations telles : fonction d'usage, fonction principale, fonction externe voire cas d'utilisation, etc. Les différentes techniques et méthodes d'obtention de ces dites fonctions se nomment : analyse fonctionnelle externe, analyse opérationnelle, analyse métier (*business process modeling*), etc. Si maintenant nous regardons l'objet d'étude avec une vision intrinsèque (l'objet en tant que tel), la notion de fonction tendra à exprimer ce que fait (ou ce plutôt ce que fera) ledit objet dans certaines conditions, bref son comportement. Nous parlerons alors de manière plus précise de fonctions techniques, de fonctions internes, ou autres et pour les techniques et méthodes permettant de les élaborer d'analyse fonctionnelle interne, de conception fonctionnelle, etc. La notion de fonction se trouve donc à la frontière de deux mondes. Quelle est la nature de cette interface ? M. Erden et al. [EKV⁺08] émettent l'idée que la fonction est un concept *pont* (passage) entre une intention humaine et un comportement physique (d'un produit). P. Vermass et W. Houkes [VH06] quant à eux suggèrent au contraire que le concept de fonction peut être employé pour séparer le monde intentionnel du monde physique. La première idée, concept de passage, est à rapprocher du modèle des cinq concepts clés, où la fonction joue un rôle central et de transition entre les deux mondes. La deuxième se justifie par l'usage fréquent dans la langue naturelle qui permet de parler de la *fonction* de quelque chose sans évoquer ou connaître sa structure physique, et justement de s'en affranchir.

Que prendre dans tout cela ? Il ne peut y avoir une réponse définitive et péremptoire tant les différentes études ont montré différents usages dans le monde de l'ingénierie, tous ayant leur légitimité (du moins locale). Pour notre part, une interprétation raisonnable du paradigme FCF d'E. Crawley est de convenir que la fonction y correspond à une expression intentionnelle, alors que ladite forme renferme plutôt les éléments structurels, y compris fonctionnels.

D'un point de vue pratique, nous pouvons avancer que nous avons affaire à au moins trois typologies de modèles dits *fonctionnels* :

Modèle d'action	Quelles actions, quels enchaînement par les différentes parties prenantes (y compris l'objet d'intérêt en vision boîte noire ou boîte blanche) ?
Modèle d'utilité	Quelles <i>fonctions</i> , c.-à-d. quelle valeur ajoutée, réalise (ou va réaliser) l'objet d'intérêt au profit des parties prenantes ?
Modèle de comportement	Comment l'objet d'intérêt se comporte-t-il (ou va se comporter) ? Abstraction d'un modèle physico-chimique dans le cas de produits technologiques, et modèle d'évolution discret ou continu (organisé suivant des hiérarchies temporelles, par exemple : opératif, tactique, stratégique) dans le cas de systèmes complexes sociotechniques.

3.1.2 Le concept

C'est sans doute l'un des termes, un des concepts, oserions-nous dire, les plus difficiles à cerner. Reprenons ici à notre compte la définition proposée par E. Crawley, B. Cameron et D. Selva dans [CCS15] : "Concept is a product or system vision, idea, notion or mental image that maps function to form" qu'ils complètent par : "It is a scheme for the system and how it works. It embodies a sense of how the system will function and an abstraction of the system form. It is a simplification of the system architecture that allows for high-level reasoning. Concept is not a product/system attribute but a notional mapping between two attributes: form and function." Sans rentrer dans les débats, et les controverses, nombreux en architecture classique sur « *la fonction précède-t-elle la forme ?* », disons simplement que :

- de la fonction vers la forme, le concept exprime la fonction d'incarnation : « Comment la fonction souhaitée, suivant quel principe, quelles idées, quelles règles... s'incarne-t-elle en une (ou plusieurs) forme(s) ? » ;
- et dans l'autre sens, en remontant à partir de la forme, le concept pourrait être vu comme l'abstraction *ultime* de cette forme, donnant une vision holistique et compacte de la solution proposée en regard d'une fonction à atteindre.

Cet aspect pivot du concept permet de marquer une séparation plus nette entre le monde du quoi et le monde du comment, là où l'étude ontologique de P. Vermaas [Ver09] aboutissait au caractère plus flou de la fonction. La fonction était vue comme une frontière, souvent poreuse, entre l'intentionnel et le structurel. Ici le concept est le passeur. Si dans un premier temps nous nous restreignons à cette idée que le concept est la fonction de transfert ou de report de la fonction sur la forme, parcourons-en quelques-unes de ses expressions possibles :

- tout simplement une expression textuelle informelle, éventuellement émaillée de croquis ;
- l'explicitation extensionnelle du passage des fonctions sur les éléments constitutifs de la forme. Cela se concrétise souvent par deux modalités : soit un tableau {fonctions} × {éléments constitutifs de la forme} et des cases cochées pour indiquer quel élément incarne/réalise quelle fonction, soit une représentation plus schématique comprenant conjointement des artefacts graphiques représentant les fonctions, d'autres pour représenter les éléments constitutifs de la forme, ainsi qu'une convention de représentation de l'incarnation de fonctions sur les éléments (classiquement des boîtes-fonction dans des boîtes-organe, ou des boîtes-fonction reliées à d'autres boîtes-organe) ;
- dans la conception axiomatique (*Axiomatic Design*) de Suh [Suh90, Suh01], ce passage est formalisé au travers d'une matrice, appelée matrice de conception (*Design Matrix*), reliant ce qu'il nomme les exigences fonctionnelles (bref une formalisation des fonctions attendues) avec les paramètres de conception (ce sur quoi nous pouvons agir, la forme, ses variables, ses degrés de liberté). Dans un ouvrage consacré aux techniques de conception G.-J. Park [Par07] dira dans son chapitre consacré à *Axiomatic Design* : "Design is the interplay between 'what we want to achieve' and 'how we achieve it'. A designer tries to obtain what he/she wants to achieve through appropriate interplay between both sides" ;
- une nouvelle modalité intéressante tendant à émerger (cf. section 1.2.3 page 13), consistant à expliciter le concept (ou l'architecture) comme la succession, ou le graphe causal des décisions instruites et prises.

Trop souvent, l'expression extensionnelle (2^e alinéa) ne rend pas le concept de l'architecture intelligible. L'éparpillement dû au grand nombre de fonctions ainsi que d'éléments constitutifs envisagés multiplie le nombre de relations d'incarnation ou de réalisation sans permettre d'en dégager un ou des motifs. Le résultat est explicitement constaté, faute d'être compris.

De manière à mieux cerner le concept en architecture, nous pouvons poser ici quelques principes qui permettront de caractériser son expression.



Définition 3.2

[Principe morphogénétique]

Un concept sera dit génératif, si à partir de la donnée des fonctions et de son énoncé, il sera possible d'inférer la forme, tout du moins dans ses grandes lignes.

Ce caractère génératif pourra être qualifié par différents attributs :

- Sa portée en termes d'audience : quelles parties prenantes peuvent s'approprier l'énoncé du concept et ainsi inférer la forme. Seulement un public de concepteurs et d'ingénieurs, ou également des métiers connexes, des opérateurs. . .
- Son acuité : permet-il d'envisager la forme à un haut niveau d'abstraction ou d'en élaborer des détails plus fins ?
- Sa précision (ou sa netteté) : permet-il de générer une et une seule forme sans fausseté, ou d'en envisager plusieurs se ressemblant et répondant toutes du même principe ?



Définition 3.3

[Principe exégétique]

Un concept sera dit explicatif, si à partir de la donnée des fonctions, des éléments constitutifs de la forme et de la connaissance du lien d'incarnation, la forme devient interprétable, explicable, compréhensible grâce à l'énoncé du concept.

Le premier principe peut être considéré comme un principe fort dans la détermination et l'énoncé d'un concept, le second comme un principe plus faible. La forme, comme la fonction, résultant d'une conception architecturale se doit de receler une forme d'organisation, ou d'avoir certaines propriétés structurelles. Elle ne saurait se résumer en un amoncellement ou une simple agrégation d'éléments.



Définition 3.4

[Principe synchronique]

Un concept apportera une vision synchronique de l'architecture s'il permet de rendre compte, d'expliquer ses propriétés organisationnelles ou structurelles à un instant donné.

Rappelons-nous également que la forme, comme d'ailleurs la fonction peuvent évoluer dans le temps, et donc aussi la correspondance entre fonction et forme. Pour autant cela ne remet pas forcément en cause le concept dans son ensemble, et au contraire le concept peut renfermer dans son essence les principes mêmes autorisant, voire guidant l'évolution, la forme changeant suivant des niveaux d'invariances [Mei98] liés, au plus haut niveau, au cycle de vie de l'objet architectural.



Définition 3.5

[Principe diachronique]

Un concept apportera une vision diachronique de l'architecture s'il permet de rendre compte ou d'expliquer quelles sont les évolutions dans le temps de la forme, éventuellement de la fonction, d'une architecture.

En s'inspirant de Ferdinand de Saussure dans le domaine de la linguistique [DS16, Wun], nous pouvons ici distinguer deux types de vision diachronique :

- Une **diachronie rétrospective** qui explicite l'évolution passée de la forme pour *en arriver là*. En ce sens, les modalités d'expression du concept précédemment évoquées, formalisant la succession causale des décisions prises, participent de cette vision diachronique rétrospective.
- Une **diachronie prospective** qui envisage et relate les évolutions possibles de la forme dans l'avenir.

3.1.3 La forme

Dans le cadre d'une conception architecturale de système, la forme finale, c.-à-d. ce que le système est (ou devrait être puisque nous sommes dans une perspective hypothétique), se définit par :



Définition 3.6

[Forme (E. Crawley)]

"Form is Elements + Structure" [Cra07]

Que nous traduisons par : « *Des éléments reliés par une structure* ». Dans [LRW15], nous avons parcouru les caractéristiques et principes essentiels concernant les éléments constitutifs d'un système et la structuration de ces éléments entre eux, proposant ainsi une ontologie préliminaire de la forme. Rappelons-en ici les traits principaux :

- Les $3P^5$: les éléments constitutifs ou organes d'un système artificiel ne sont pas réduits uniquement à des produits, mais peuvent comprendre également des personnes (en tant que rôle spécifique joué⁶!) et des procédures (ou processus, ou protocole).
- Il faut entendre produit dans un sens large, recouvrant à la fois des produits tangibles (produits manufacturés, par exemple) et des produits intangibles (offre de service, par exemple).
- La structure reliant les différents éléments se traduit par les liens et des relations :
 - un lien établit une liaison entre un ou des éléments et un ou des autres qui peuvent permettre la mise en contact, et l'échange entre ces éléments ou au contraire les isoler entre eux. Ces liens peuvent donc porter des échanges de flux entre les éléments considérés, ou au contraire les empêcher, les atténuer, les filtrer ;

5. 3P, pour Personne, Produit et Processus ou *People, Product and Process*.

6. Une personne participe d'une solution architecturale, et est donc un élément de la forme, non pas en tant qu'individualité (morale ou physique), mais par le rôle qu'elle joue dans le système. Dans une solution architecturale, nous concevons des rôles, leur organisation, leurs relations, leur déontologie... et bien entendu nous ne concevons pas des êtres humains.

- une relation traduisant qu'il existe un rapport entre deux éléments sans pour autant qu'il existe obligatoirement un lien entre eux. Par exemple, à des fins d'équilibrage et de centrage, deux éléments peuvent être diamétralement opposés. Cela ne signifie pas pour autant qu'ils soient reliés entre eux.
- Les liens entre les éléments constitutifs sont de même nature que les éléments eux-mêmes. Ils se concrétisent en des éléments de nature *3P*.

Poursuivant avec notre exemple d'un hôpital, classons quelques-uns des éléments constitutifs suivant les trois P (et toujours sans aucune prétention à l'exhaustivité).

Exemple : l'hôpital

- **Produits** : lit médicalisé, salle d'opération, appareil radiographique, fichier patient, salle de soin, pharmacie, réserve d'oxygène, stérilisateur, groupe électrogène de secours... ;
- **Personnes** : patient, infirmière, médecin, anesthésiste, chirurgien, pharmacien, interne, agent administratif, technicien de laboratoire, agent d'entretien spécialisé... ;
- **Procédures** : procédure d'admission, procédure de sortie, protocole clinique, protocole de soins... .

Une annexe (cf. annexe B page 219) apporte quelques compléments et réflexions au sujet de la forme.

3.1.4 Critique du FCF d'E. Crawley

Nous utiliserons la représentation ci-après (cf. figure 3.2), différente et équivalente de celle d'E. Crawley pour désigner "Architecture [...] consists of: Function, related by Concept, to Form". Nous proposons de traduire cette définition par : « *Une architecture est l'incarnation d'une fonction dans une forme au travers d'un concept* ». Cette représentation nous sera plus aisée par la suite pour l'étendre et élaborer autour de ce premier paradigme.

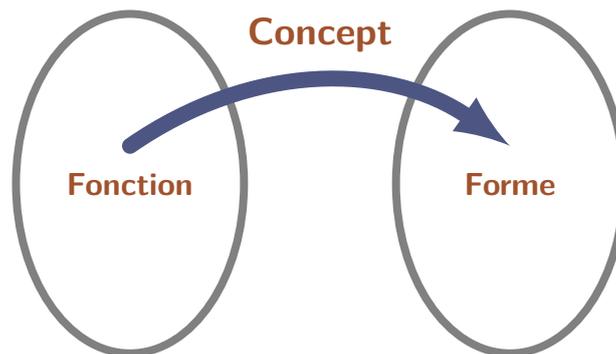


Figure 3.2: Représentation adaptée du FCF

Les mérites d'une telle définition tiennent dans les trois points suivants.

- Elle est indépendante de la notion de système, une architecture peut être une simple hypothèse.
- Elle embarque et lie de manière cohérente et complémentaire le côté « *À quoi ça sert ?* » avec « *Comment c'est fait ?* », alors que nombre de définitions se cantonnent au « *Comment c'est fait ?* ».

- Elle force à penser le passage de la fonction à la forme, et donc d'explicitier le concept. Cela reprend l'idée de Suh [Suh90, Suh01] d'un passage (*mapping*) du domaine fonctionnel sur le domaine physique. G.-J. Park dans son introduction à Axiomatic Design dans définit la conception comme : "Design is the interplay between 'what we want to achieve' and 'how we achieve it'. A designer tries to obtain what he/she wants to achieve through appropriate interplay between both sides." [Par07]

Les limitations les plus notables peuvent se condenser dans les deux points suivants.

- La forme d'une architecture peut être évolutive dans le temps (c'est souvent pratiquement le cas). Ce qui revient à dire que les éléments ainsi que la structure les reliant peuvent évoluer. Cet aspect dynamique de la forme n'est pas évoqué dans le paradigme d'E. Crawley, bien que ne l'interdisant pas.
- Les éléments interagissent (par le biais de la structure) et exhibent un comportement. Cet aspect comportemental semble être escamoté de la définition.

3.2 Le cadre FBS de J. Gero et ses extensions

Le triptyque « *Fonction, Forme (ou structure), Comportement* » apparaît comme un leitmotiv dans de nombreux travaux sur la conception⁷ [GRV09].

3.2.1 Le FBS

Une des formalisations de référence est certainement celle de J. Gero, et son *fameux* cadre FBS (*Function-Behaviour-Structure Framework*) [Ger90], où autour de ces notions de fonction, forme/structure et comportement, il va placer huit processus fondamentaux participant de la conception. Plus précisément, les éléments qui forment ce cadre pour la conception d'un objet sont (cf. figure 3.3 page suivante) :

- Les **fonctions** (F , *function*) : l'ensemble des fonctions que l'objet d'étude doit réaliser. Cela recouvre l'idée de fonction dans le paradigme d'E. Crawley. Notons tout de suite qu'il faut prendre ici le terme de *fonction* dans son acceptation large (la fonction accompagnée de ses caractéristiques, ce que d'aucuns appellent le *non fonctionnel*).
- La **structure** (S , *structure*) : les constituants de l'objet d'étude et leurs relations. En fait, la forme au sens du paradigme d'E. Crawley.
- Le **comportement attendu** (B_e , *expected behaviour*) : l'ensemble des comportements que l'objet est censé réaliser dans l'accomplissement de ses fonctions F .
- Le **comportement dérivé de la structure** (B_s , *structure behaviour*) : l'ensemble des comportements qu'exhibe la structure S .

7. "Computational research on engineering design and problem solving has led to several ontologies for teleological modeling such as Functional Representation (Chandrasekaran 1994; Chandrasekaran & Josephson 2004; Sembugamoorthy and Chandrasekaran 1986), Function- Behavior-Structure (Gero 1990; Gero, Tham & Lee 1992), and Function-Behavior-State (Umeda et. al. 1990; Umeda et. al. 1997; Umeda & Tomiyama 1996). By ontology, we mean a vocabulary of knowledge representation (cf. Bunge (1977), who views ontology as pertaining to the nature of the world). The Structure-Behavior-Function (or SBF) knowledge representation language (Bhatta & Goel 1994, 1997; Goel et. al. 1996; Goel & Bhatta 2004; Prabhakar & Goel 1997) provides one such ontology for teleological modeling." [GRV09].

À ces éléments de base de l'ontologie sont rajoutées deux notions qui vont permettre ensuite de définir les processus fondamentaux de la conception [GK02] (cf. figure 3.3) :

- Les **exigences** (R , *requirement*) : la formalisation des intentions du client (donc externe à la conception).
- La **description** (D , *description*) : la description de la conception, à savoir l'information nécessaire et suffisante pour *construire* l'objet d'étude.

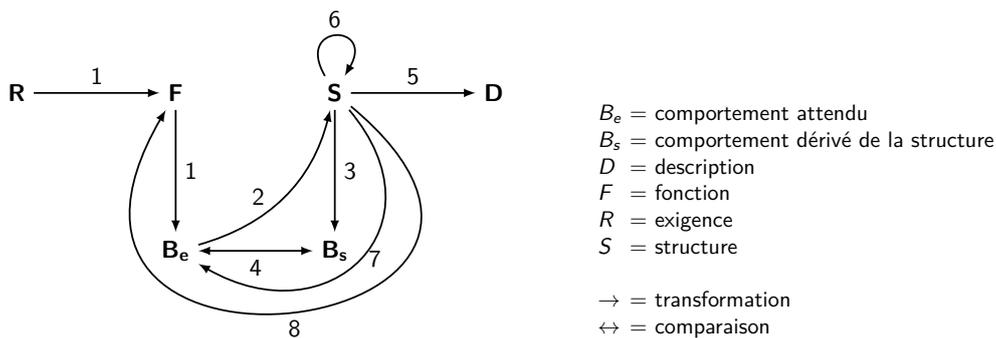


Figure 3.3: Le FBS initial (d'après [GK14])

Ce qui permet de poser cinq processus fondamentaux de toute démarche de conception :

- La **formulation** ($F \rightarrow B_e$, processus 1) transforme le problème de conception, exprimé sous forme de fonctions à atteindre, en un ensemble de comportements attendus afin de produire ces fonctions. Dans la version augmentée, cela comprend également la transformation d'un jeu d'exigences en fonctions.
- La **synthèse** ($B_e \rightarrow S$, processus 2) transforme le comportement attendu dans une solution sous forme d'une structure qui est supposée exhiber le comportement attendu.
- L'**analyse** ($S \rightarrow B_s$, processus 3) déduit de la structure le comportement "as designed".
- L'**évaluation** ($B_e \leftrightarrow B_s$ processus 4) compare le comportement obtenu à partir de la structure avec le comportement attendu, et ainsi fournit des éléments d'aide à la décision pour statuer sur l'acceptabilité de la solution.
- La **documentation** ($S \rightarrow D$, processus 5) qui produit la description adéquate pour la construction, la production, le développement... de l'objet considéré.

En fonction du résultat de l'évaluation, le cadre de J. Gero pointe trois autres processus dits de *reformulation*.

- La **reformulation structurelle** ($S \rightarrow S$, processus 6) qui consiste à faire évoluer la structure afin d'obtenir un comportement plus en adéquation avec le comportement attendu.
- La **reformulation comportementale** ($S \rightarrow B_e$, processus 7) qui consiste à remettre en cause et faire évoluer le comportement attendu, pour qu'il se rapproche plus du comportement que permet d'obtenir la structure. Ce mécanisme traduit le fait qu'en élaborant des structures (au sens de J. Gero)

et les analysant nous apprenons sur ce qu'il est possible d'atteindre et sur la manière de l'atteindre. C'est donc un processus d'ajustement sur la manière de réaliser les fonctions attendues de l'objet d'étude, sans pour autant changer le pourtour fonctionnel.

- La **reformulation fonctionnelle** ($S \rightarrow F$, processus 8) qui consiste en une remise en cause plus profonde que la reformulation précédente, à savoir ici remettre en cause les fonctions mêmes que l'objet d'étude est censé réaliser, toujours suite à une meilleure connaissance du problème à traiter.

Ce cadre pour la conception *en général* semble bien s'adapter au cadre de la conception architecturale et vient compléter et renforcer le paradigme d'E. Crawley.

FCF d'E. Crawley	FBS de J. Gero
Fonction	Fonction
Forme (des éléments reliés par une structure)	Structure (la structure comprend ici les éléments et les liens entre eux)
Concept	Pas explicitement décrit en tant que tel, mais des activités (des processus), particulièrement le 2.

TABLE 3.2: Correspondance FCF d'E. Crawley/FBS de J. Gero

La forme ne se réduit pas à une vision structurelle. Le FBS de J. Gero la complète en y adjoignant le comportement issu d'une telle structure (le comportement émergent), et une description (un plan) du résultat.

3.2.2 Le FBS situé

Gero fait deux constats de l'usage de son FBS [GK02] :

- le fait d'insérer une *forme* dans un contexte modifie (ou pas) ce contexte! La perception et l'interaction du concepteur avec le contexte, y compris celui hypothétique qui serait modifié détermine fortement la conception elle-même, d'où l'idée que la conception est une *cognition située* ;
- les processus prépondérants sont les processus de reformulation (6, 7 et 8).

Encart 3.1

[Cognition Située]

L'idée de départ dans la théorie de la cognition située consiste à poser que celle-ci ne peut être dissociée de son environnement, que l'esprit est ontologiquement et fonctionnellement entremêlé avec son contexte, qu'il soit social, culturel, ou physique. Elle s'écarte d'une tradition dualiste cartésienne où l'esprit est séparé de son contexte, mais peut interagir avec lui au travers de représentations mentales (des modèles!) qu'il manipule. Ce postulat est résumé dans l'aphorisme de Clancey [Cla97] : "where you are when you do what you do matters". Ce principe peut être étendu à l'apprentissage : les appre-

nants participent de toute démarche d'apprentissage avec un bagage initial et dans un contexte donné, favorable ou non. Les conséquences immédiates (ou les reformulations plus précises du postulat de départ de la cognition située) sont :

- le savoir est inséparable de l'action ;
- une action ne peut être dissociée du contexte dans laquelle elle est effectuée.

D'autres conséquences, moins immédiates, résident dans :

- la formalisation du savoir (connaissances) ne capture pas forcément la manière dont il sera employé, et son usage effectif n'est pas forcément purement mécanique, mais, en fonction du contexte, adapté, par un jeu et un couplage entre perception, conception et action ;
- perception, conception, action et éventuellement description sont causalement entremêlées et s'enrichissent mutuellement.

Alain Mille, professeur émérite en Intelligence Artificielle à l'Université Claude Bernard Lyon 1 résume cela en : « [...] *la cognition située est l'étude de comment la connaissance humaine se développe comme un moyen de coordonner l'activité depuis l'intérieur de l'activité elle-même. Cela signifie que le feedback – survenant de manière interne et avec l'environnement selon les moments – a une importance fondamentale. La connaissance possède donc une dynamique aussi bien dans sa formation que dans son contenu.* » [Mil04]

Du constat précédent, J. Gero met en avant une certaine idée de réflexivité et de récursivité dans la démarche conceptuelle. La démarche de conception ne peut être dissociée de son concepteur. Ce qu'il conceptualise et modélise par les interactions entre trois *mondes* [GK02, GK06] (cf. figure 3.4 page ci-contre) :

- Le **monde externe** (*external world*) : ce monde comporte les représentations qui sont *hors du concepteur*. Ce terme peut prêter à confusion, car il désigne à la fois le monde *réel*, c.-à-d. sensible, et dans le contexte plus précis de la conception l'ensemble des représentations des objets externes au concepteur [GK00].
- Le **monde interprété** (*interpreted world*) : c'est le monde que le concepteur *construit* dans son esprit à partir de ses expériences (multi)sensorielles, sa perception et sa conception du monde. Cela se traduit par les représentations internes du monde extérieur avec lequel le concepteur interagit.
- Le **monde attendu** (*expected world*) : c'est un monde prédit, imaginé par le concepteur tel qu'il devrait être une fois accomplies les actions proposées pour atteindre les buts posés.

Le passage d'un monde à l'autre s'effectue par trois interactions différentes (cf. figure 3.4 page suivante) :

- L'**interprétation** (*interpretation*) : la transformation des représentations du monde externe et des expériences (multi)sensorielles en des représentations, des modèles, des concepts... qui constituent le monde interprété du concepteur.

- La **sélection** (*focussing*) : Le passage du monde interprété vers le monde attendu s'accomplit en sélectionnant les aspects jugés comme étant des buts à atteindre et en suggérant un enchaînement d'action qui devrait aboutir à l'objectif retenu. Il est à noter qu'une première version du FBS situé [GK00] proposait comme interaction : la formulation d'une hypothèse, ou la projection (*hypothesizing*).
- L'**action** (*action*) : La mise en œuvre des actions proposées doit avoir pour effet de changer le monde externe et ainsi d'accomplir les buts visés.

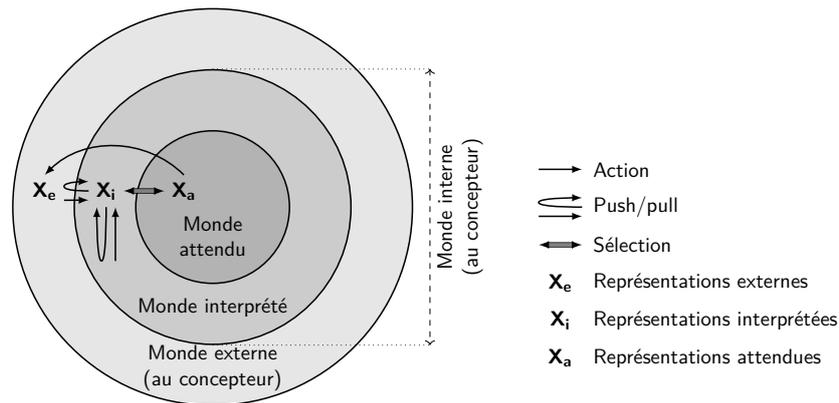


Figure 3.4: Mondes imbriqués et interactions (d'après [GK02])

Gero met en avant un mécanisme contributif à l'interprétation : la mémoire constructive (*constructive memory*). L'idée ici, appliquant la théorie de la cognition située, est que le concepteur part avec une connaissance initiale construite de ses expériences passées (ses précédentes interactions avec le monde externe). Cette connaissance initiale est donc dépendante de l'histoire même du concepteur : elle est *située*. Gero avance que cette mémoire se construit par un double processus entremêlé [GK02, GK06] :

- un processus Push (*push process*) : la production de représentations internes est dirigée (« poussée ») par les données de l'environnement ;
- un processus Pull (*pull process*) : l'interprétation est dirigée (« tirée ») par les connaissances et conceptualisations préalables du concepteur.

Ce processus de push-pull agit à la fois comme mécanisme d'interaction entre le monde externe et le monde interprété (ce que nous avons nommé l'interprétation), et comme entretien et construction de la mémoire interne (mémoire constructive). La figure 3.5 montre cet entrelacement entre interprétation et mémoire constructive et leurs influences réciproques. Les interprétations du monde externe en représentations du monde interne influent la construction de la mémoire du concepteur. Réciproquement, la mémoire du concepteur influe sur la manière dont il interprète le monde externe et le conceptualise (*modélise*?).

Gero évoque également [GK02] le recours à des esquisses ou des croquis (*sketches*) comme une façon de réinterpréter et d'orienter la conception.

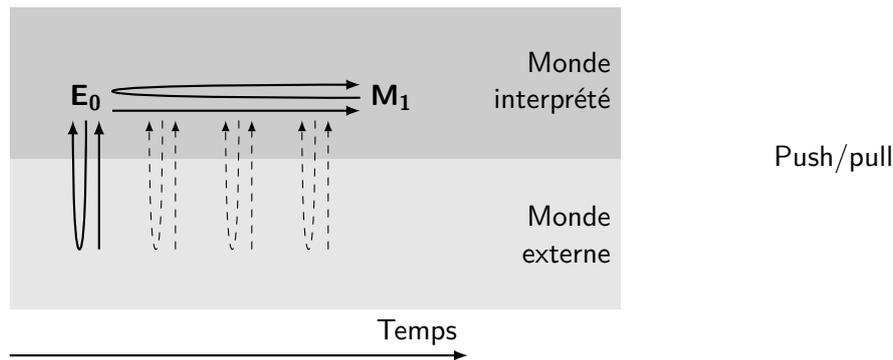


Figure 3.5: Mémoire constructive et interprétation (d'après [GK02])

L'application de ce mécanisme d'interprétation et de mémoire constructive, et le modèle à trois mondes va permettre de construire le FBS situé. En suivant la logique de J. Gero et U. Kannengiesser [GK06], détaillons les étapes de cette construction.

1^{ère} étape : monde externe et monde interprété

La projection du FBS dans chacun de ces deux mondes résulte en la déclinaison suivante :

- (F^e, B^e, S^e) , la fonction externe, le comportement externe, et la structure externe ;
- (F^i, B^i, S^i) , la fonction interprété, le comportement interprété, et la structure interprété ;

assortie des processus push/pull d'interprétation (entre le monde externe et le monde interprété) et de mémoire constructive (intrinsèque au monde interprété) (cf. figure 3.6a page ci-contre).

2^{ème} étape : monde attendu

L'ajout du monde attendu marque le fossé entre l'état perçu du monde et l'état souhaité. L'atteinte de cet état souhaité se traduit par des actions portant sur le monde externe. La projection du FBS dans chacun de ces deux mondes résulte en la déclinaison suivante :

- (F^e, B^e, S^e) , la fonction externe, le comportement externe, et la structure externe ;
- (F^i, B^i, S^i) , la fonction interprété, le comportement interprété, et la structure interprété ;
- (F^a, B^a, S^a) , la fonction attendue, le comportement attendu, et la structure attendue ;

augmentée cette fois des processus de transformation (action) et de sélection (cf. figure 3.6b page suivante).

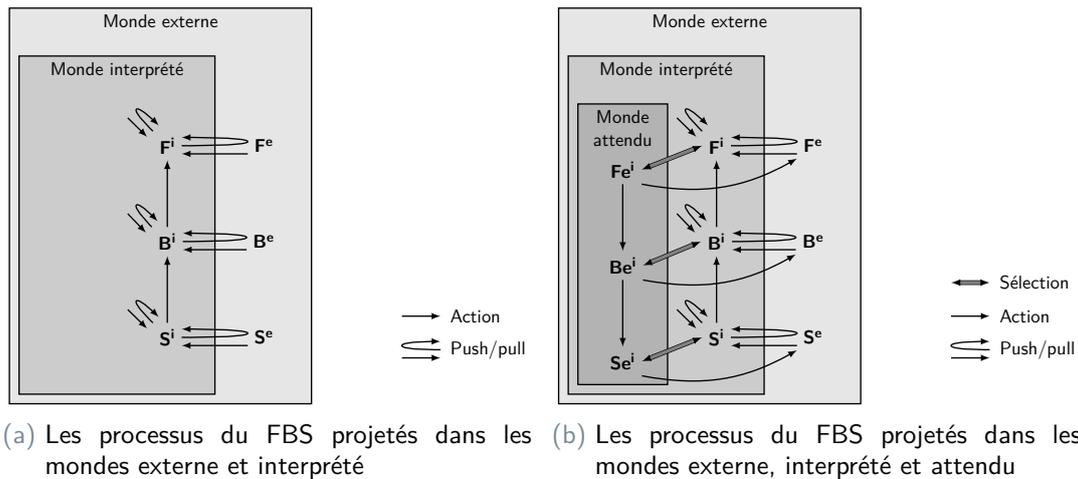


Figure 3.6: Les processus du FBS projetés dans les trois mondes (d'après [GK07])

3^{ème} étape : le FBS situé

La version finale du FBS situé, présentée par J. Gero et U. Kannengiesser [GK06], est une version complétée du FBS projeté dans les trois mondes (cf. étape 3.2.2). Les extensions portent sur :

- l'ajout d'exigences externes relatives à la fonction (FR^e), au comportement (BR^e) et à la structure (SR^e), comme éléments de départ à la conception, fournies et discutées avec des parties prenantes externes (client, autorité...), la fonction externe, le comportement externe, et la structure externe avec les processus d'interprétation correspondants ;
- un processus d'évaluation entre le comportement interprété et le comportement attendu.

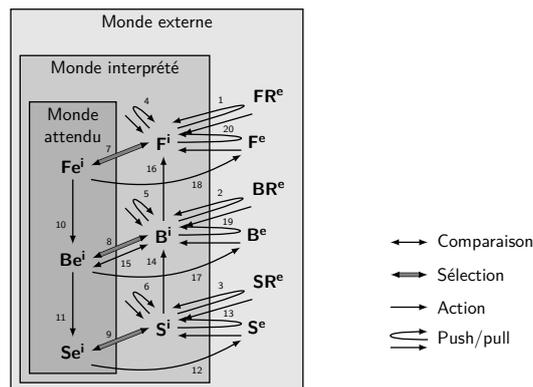


Figure 3.7: Le FBS situé (version d'après [GK06])

Nous aboutissons à la cartographie des processus montrée par la figure 3.7 comportant en tout 20 activités. Nous retrouvons les 8 processus fondamentaux revus et corrigés du FBS, comme suit.

- La **formulation** (cf. figure 3.8a page 93) permet de cadrer la conception en déterminant l'espace des solutions possibles (désigné comme étant le *structure state space*, activité 9), et un ensemble de critères pour évaluer ces solutions (désigné comme étant le *behaviour state space*, activité 8 et 10)

afin d'atteindre un objectif établi (désigné comme étant le *function state space*, activité 7). Cette formulation se base sur l'interprétation d'exigences externes portant sur les fonctions (activité 1), les comportements (activité 2) et la structure (activité 3), ainsi que le recours à la mémoire construite du concepteur relativement aux fonctions (activité 4), comportements (activité 5) et à la structure (activité 6).

- La **synthèse** (cf. figure 3.8b page suivante) produit une solution qui est une solution particulière de l'espace des solutions (activité 11) et l'exhibe (activité 12).
- L'**analyse** (cf. figure 3.8c page ci-contre) interprète la structure synthétisée (activité 13) et en dérive un comportement (activité 14).
- L'**évaluation** (cf. figure 3.8d page suivante) compare le comportement attendu avec le comportement interprété (activité 15).
- La **documentation** (cf. figure 3.8e page ci-contre) produit une représentation externe de la conception en termes de fonction (activité 18), comportement (activité 17) et structure (activité 12).
- La **reformulation structurelle** (cf. figure 3.8f page suivante) régénère l'espace des solutions possibles (désigné comme étant le *structure state space*, activité 9). Cette reformulation est potentiellement alimentée par les activités 3, 6 ou 13 (indiquées en grisé dans la Figure 3.8f).
- La **reformulation comportementale** (cf. figure 3.8g page ci-contre) régénère l'ensemble des critères d'évaluation des solutions possibles (désigné comme étant le *behaviour state space*, activité 8). Cette reformulation est potentiellement alimentée par les activités 2, 5, 14 ou 19 (indiquées en grisé dans la Figure 3.8g).
- La **reformulation fonctionnelle** (cf. figure 3.8h page suivante) remet en question les objectifs (désigné comme étant le *function state space*, activité 7). Cette reformulation est potentiellement alimentée par les activités 1, 4, 16 ou 20 (indiquées en grisé dans la Figure 3.8h).

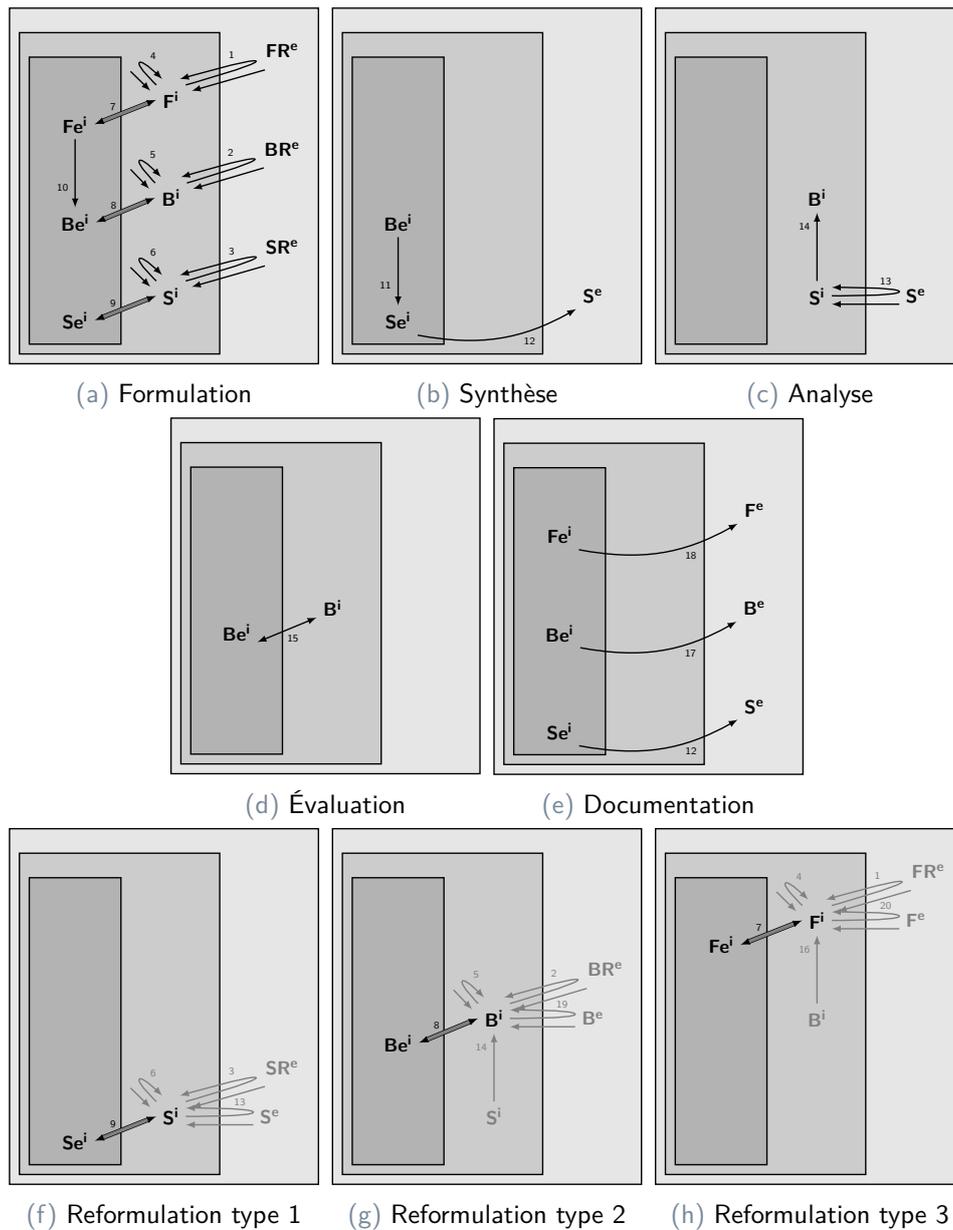


Figure 3.8: Les 8 processus du FBS projetés dans les trois mondes (d'après [GK07])

3.2.3 Critique du FBS de J. Gero et ses extensions

Le paradigme de J. Gero est singulier dans le sens où il embarque non seulement une ontologie de base, mais également un modèle cognitif de la conception. Cet aspect le rend particulièrement intéressant pour notre réflexion visant à proposer un paradigme opérant de la conception architecturale. Un autre aspect qui ressort du FBS de J. Gero, et que nous estimons comme essentiel pour la constitution de notre paradigme est l'absence de passage *direct* de la fonction à la forme, mais la nécessité d'un médiateur, ici le comportement ("[...] 'behaviour is the battleground' of designing, as Gero says" [DV05]). Ceci évacue toute tentative de réduire la conception à un jeu d'allocation des fonctions (obtenues par une décomposition de la fonction initiale) sur des constituants idoines.

Si la démarche de J. Gero est plus que méritoire, elle appelle néanmoins quelques réserves. Nous pouvons opposer deux critiques concernant le FBS situé.

D'une part, la notion de Monde externe comporte une part de flou et d'imprécision. S'agit-il du monde réel⁸ ou d'une représentation de ce monde. Si nous nous référons à l'allégorie de la caverne de Platon, le Monde interprété correspondrait à l'interprétation que se font les hommes enchaînés au fond de la caverne de ce qu'ils voient, ou entendent : « *Ils nous ressemblent* ». En revanche l'ambiguïté réside sur la notion du Monde externe, s'agit-il des ombres projetées sur la voûte de caverne (représentations) ou des hommes qui vivent dehors (monde réel).

D'autre part, J. Gero pose ses différents mondes comme étant imbriqués les uns dans les autres : le monde attendu est une partie du monde interprété, lui-même une partie du Monde externe (cf. figure 3.4 page 89). Cette vision est non seulement discutable, mais n'apporte pas grand-chose au raisonnement.

Le philosophe P. Veermas et l'expert en Design K. Dorst ont certainement produit l'analyse critique du paradigme de J. Gero la plus aboutie [DV05]. Nous en prenons ici une synthèse.

Tout d'abord ils notent, comme nous l'avons fait pour le FCF d'E. Crawley, l'aspect parfois incertain, imprécis ou ambigu des concepts clés introduits (Fonction, Comportement, Structure). Au-delà de cela, ils reviennent à la différence fondamentale entre *intentionnel* et *structurel*, et à la différence entre les descriptions intentionnelles versus les descriptions structurelles des artefacts. Même si une démarcation formelle entre ces concepts n'est pas forcément envisageable et que nous pouvons toujours déceler une forme de porosité entre ces concepts, nous pouvons trivialement énoncer que l'intentionnel s'attache à « *ce que cela fait* », et « *pourquoi ça le fait* », alors que le structurel s'occupe de « *comment ou de quoi c'est fait* ». La conception se doit d'apporter dans son processus un mode de passage opérant entre intentionnel et structurel.

Leur analyse critique de l'évolution dans le temps des concepts de base du FBS aboutit à s'apercevoir que la frontière entre intentionnel et structurel est fluctuante et imprécise. Si cela est dommageable pour valider épistémologiquement le modèle (certes, le FBS ne pourra prétendre à être une science de la conception), est-il pour le moins non opérant ? Cela sera d'ailleurs leur constat : "These widely different goals lead to completely different criteria for the 'quality' of the FBS model, and to different roles of empirical data in the 'validation' of the model. If the FBS model is to provide a better understanding of the way in which designers actually design, it should properly reproduce the data of empirical studies of designing. But if it is to provide the right means to system developers to develop computer tools for designing, compliance to empirical data may become less important. The FBS model may then be validated if it meets the quality criterion of elegance or usefulness of the algorithms that it suggests to the developers of the tools [...] " [DV05].

Si un des grands mérites du FBS est d'explicitement inclure des notions intermédiaires pour assurer la transition de l'intentionnel au structurel, en revanche localiser ce passage en un seul point (le comportement) leur paraît trop restrictif et ne capture pas la diversité des démarches et situations. En clair, peu importe où cette transition s'effectue, cela dépend des cas traités, pourvu qu'elle adienne. Sur les différentes activités, un point est soulevé concernant leur granularité et comment elles s'assemblent pour former un processus, ou comment elles s'inscrivent dans un processus de conception stratégique de plus haut niveau.

Dans un nouvel article [VD07], ils proposeront une modification des concepts et des activités (renommées étapes – *steps*). En particulier, ils rapprochent la notion de fonction de celle de disposition, lui donnant un sens plus proche de certains autres domaines, cherchant là une forme de continuité épistémologique.

8. Il convient de prendre toutes les précautions sur l'usage de ce terme. Il ne s'agit pas pour nous de deviser ni sur l'existence du monde réel, ni sur son ontologie, mais de prendre cette locution dans son sens courant, celui du monde concret dans lequel nous vivons.

TABLE 3.3: Redéfinition des concepts clés du FBS selon [VD07]

<i>Purpose(P)</i>	The design intention.
<i>Functions(F)</i>	Those physical dispositions of an artefact that contribute to the purpose for which the artefact is designed.
<i>Behaviour(B)</i>	The physical disposition of the artefact.
<i>Structure(S)</i>	The materials of the artefact, the dimensions and geometry of these materials, and their topological relations.

TABLE 3.4: Redéfinition des étapes du FBS selon [VD07]

1 : Formulation	$P \rightarrow F$	Transformation of the client's purposes into functions (physical dispositions) expected to contribute to these purposes.
2 : Synthesis	$F \rightarrow S$	Transformation of these functions (these physical dispositions) into a structure of the artefact that is to exhibit the functions.
3 : Analysis	$S \rightarrow B$	Derivation of the actual behaviour (all the physical dispositions) of the artefact from the description of the structure.
4 : Evaluation	$B \leftrightarrow F$	Comparison of the actual behaviour and the functions : do the dispositions of the artefact include the functions ?
5 : Documentation	$S \rightarrow D$	Production of the design description.
6 : Reformulation 1	$S \rightarrow S'$	Choice of a new structure.
7 : Reformulation 2	$S \rightarrow F'$	Choice of new functions.
8 : Reformulation 3	$S \rightarrow P'$	Choice of new purposes.

P. Galle, chercheur danois en philosophie et design, repart du travail critique de K. Dorst et P. Vermaas pour proposer une relecture du FBS [Gal09].

Son point de départ tient dans l'embaras concernant la référence à l'artefact visé. Dans une vision puriste⁹, cet artefact ne saurait préexister, sa réalisation succédant à sa conception.

Il propose ainsi deux interprétations et deux modifications du modèle, l'une adoptant une démarche *nominaliste* (centrée sur le symbolique et la représentation, et un raisonnement initial abductif), l'autre *réaliste*¹⁰ (centrée sur la notion d'objets matériels, et l'*existence* propre des notions de fonction, comportement et structure, indépendamment de l'artefact visé). Nous reproduisons ci-après ces deux propositions.

9. "To design is to plan for the making of something new. In the case of architecture, this "something" is an artifact of the physical environment." [Gol91].

10. Nous incluons la version réaliste par respect pour les travaux de P. Galle, afin de ne pas imputer son apport, mais nous jugeons que cette approche correspond trop à des objets physiques, et nous éloigne trop de la notion de systèmes artificiels sociotechniques complexes. Nous ne tiendrons pas compte de cette vision dans nos travaux ultérieurs.

TABLE 3.5: Redéfinition des étapes du FBS selon une approche nominaliste d'après [Gal09]

1 : Formulation	$P \rightarrow F$	Transformation of the client's purpose-description P into a function-description F (a physical-disposition-description) such that bringing about the truth of F is expected to contribute to making P true.
2 : Synthesis	$F \rightarrow S$	Transformation of the function-description F (the physical-disposition-description) into a structural artefact-description S such that bringing about the truth of S (i.e. carrying out an act of artefact-production according to S) is expected to cause the truth of F .
3 : Analysis	$S \rightarrow B$	Derivation of an actual-behaviour-description (i.e. a physical-disposition-description) B from S such that bringing about the truth of S will bring about the truth of B .
4 : Evaluation	$B \leftrightarrow F$	Comparison of the actual-behaviour-description B and the function-description F : does B imply F ?
5 : Reformulation 1 (formerly 6)	$S \rightarrow S'$	Choice of a new structure-description.
6 : Reformulation 2 (formerly 7)	$S \rightarrow F'$	Choice of a new function-description, given S .
7 : Reformulation 3 (formerly 8)	$S \rightarrow P'$	Choice of a new purpose-description, given S .

TABLE 3.6: Redéfinition des étapes du FBS selon une approche réaliste d'après [Gal09]

1 : Formulation	$P \rightarrow F$	'Transformation' of the client's purposes (P) into a function (F) serving them.
2 : Synthesis	$F \rightarrow S$	'Transformation' of the function (F) into a structure (S) whose behaviour is expected to include the function.
3 : Analysis	$S \rightarrow B$	Derivation of the behaviour (B) of the structure (S).
4 : Evaluation	$B \leftrightarrow F$	Comparison of behaviour (B) and the function (F) : does the behaviour include the function ?
5 : Documentation	$S \rightarrow D$	Production of a description (D) of the structure (S) that enables a maker to produce one or more material objects embodying that structure.
6 : Reformulation 1	$S \rightarrow S'$	Choice of a new structure.
7 : Reformulation 2	$S \rightarrow F'$	Choice of new functions.
8 : Reformulation 3	$S \rightarrow P'$	Choice of new purposes.

Ces deux premiers paradigmes ont l'avantage certain d'avoir été confrontés à de nombreuses situations et s'être révélés opérants. Ils partagent des fondamentaux (la partition fonction-forme, ou fonction-structure). Sans être directement applicables au domaine de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes (à notre sens), ils permettent de poser les fondations d'un tel paradigme en étant une véritable source d'inspiration pour notre travail personnel, et ainsi enclencher une première bissociation qui va nous amener à proposer un premier paradigme.

3.3 Première bissociation : FCF \oplus FBS

Nous reprenons ici le terme de bissociation introduit par Arthur Koestler [Koe64], pour nommer le processus intégratif de création, par composition ou fusion de deux éléments préexistants. Le premier nouveau paradigme que nous proposons dans le cadre de ces travaux est obtenu en *bissociant* le FCF d'E. Crawley, avec le FBS de J. Gero.

3.3.1 Paradigme simplifié

Une première étape de bissociation entre le paradigme FCF d'E. Crawley et le paradigme FBS de J. Gero aboutit à la proposition initiale suivante, dénotée $(FB)^2(C)^2$, pour (*F*unctions, *E*xpected *B*ehaviour, *F*orms, *E*mergent *B*ehaviour, *C*oncept, *C*ontexts) (cf. figure 3.9 page suivante). Ce qui nous amène à cette première redéfinition simplifiée d'une architecture :



Définition 3.7

[Architecture (premier paradigme simplifié)]

Une architecture est l'incarnation de fonctions requises, explicitées au travers d'un comportement attendu, dans des formes présentant des comportements émergents, au travers d'un concept, en considérant ses fonctions et ses formes immergées dans les différents contextes relatifs à l'opportunité considérée.

"The embodiment of required Functions, clarified through an Expected Behavior, into Forms leading to some Emergent Behavior, through a Concept, considering its immersion into various Contexts related to the given opportunity." [LW17]

Ce premier paradigme, très proche du FCF d'E. Crawley, appelle les commentaires suivants :

Afin de refléter les différentes dimensions possibles de la *Fonction* et de la *Forme* dans le cadre de l'architecture de systèmes artificiels complexes, ces termes ont été mis au pluriel.

Le terme de **ONT Fonction** est pour le moment encore conservé¹¹ bien que dans le cadre de l'architecture de systèmes artificiels complexes, nous cherchions à atteindre, à réaliser, à fournir des capacités ou des services, plutôt que de *simples* fonctions. La notion de fonction semble être ici de trop bas niveau et s'adapte mieux à l'ingénierie et la conception de produits.

11. Pour une simple raison mnémorique, ce qui permet de nommer ce premier paradigme simplifié $(FB)^2(C)^2$.

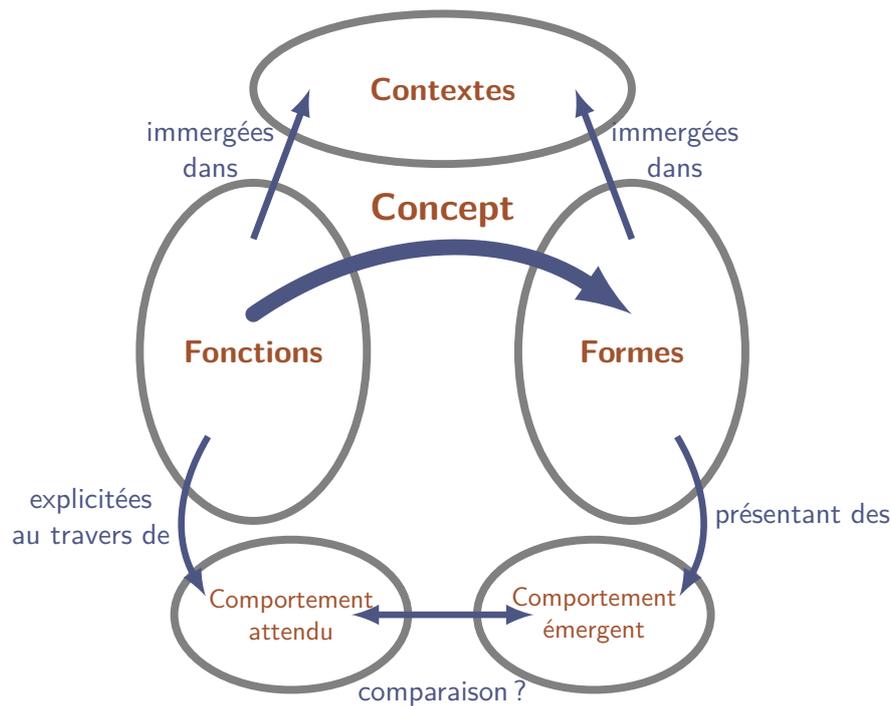


Figure 3.9: Paradigme simplifié $(FB)^2(C)^2$

Exemple : le pont

Si nous considérons un pont, une approche fonctionnelle pourrait le réduire à la *simple* fonction de « Permettre aux personnes, aux véhicules, aux trains... de traverser d'un côté à l'autre », alors que l'aborder au travers d'un prisme capacitaire ferait surgir des aspects, des capacités d'ordre politique, économique, social, opérationnel par la connexion de deux mondes *différents*, comme relier une île au continent – par exemple, le pont de l'île de Ré – ou rapprocher deux pays d'un point de vue économique, académique, social, culturel... – par exemple, le Øresundsbron reliant le Danemark et la Suède –.

Le pluriel utilisé pour *fonction* reflète non seulement son caractère multiple (architecturer l'opportunité en un système peut aboutir à fournir conjointement différentes capacités), mais également la multiplicité des perspectives ou des niveaux. Par exemple, à un niveau politique ou stratégique, nous pourrions évoquer la capacité de dissuasion nucléaire, à celui opérationnel ou tactique celle de combat urbain, de protection des populations civiles, et au niveau du constituant ou du produit, où nous parlerions plus volontiers de performance ou d'efficacité, la « *no escape zone* » d'un missile.

En ce qui concerne la **ONT** **Forme**, cette dernière peut revêtir différents aspects dans le cadre de l'architecture de systèmes artificiels complexes : opérationnel, organisationnel, facteurs humains, services, infrastructure technique, infrastructure immobilière...

De plus, la seule spécification de la ou des *Fonctions* et explication de la ou des *Formes* ne traduit pas entièrement ce que pourrait recouvrir une architecture. Il lui manque en particulier l'aspect comportemental.

Du côté de la fonction cela se traduit par ce que nous nommons le **ONT** **Comportement attendu**, c.-à-d. la, ou plutôt les traductions, par les différentes parties prenantes, de comment elles attendent que les capacités énoncées soient rendues. Une modalité de plus en plus courante est le recours à la narration sous diverses formes (« *use case* », « *users stories* », scénarios, « *storyboard* »...). De tels scénarios sont *classiquement* regroupés dans les conteneurs documentaires que sont le CONOPS (*Concept of Operations*), le CONEMP (*Concept of Employment*) ou le CONUSE (*Concept of Use*).

Du côté de la forme, les interactions entre les éléments engendrent un comportement du système observable, dit **ONT Comportement émergent**. La forme, dans sa définition initiale, se définit comme un ensemble d'éléments reliés entre eux par une structure (cf. section 3.1.3 page 83). Maîtriser les interactions entre les différents éléments permet d'atteindre les comportement émergents aboutissant aux propriétés attendues.

Dans une approche systémique, une architecture se doit d'être enrichie en la contextualisant. Voire nous pourrions affirmer qu'elle ne saurait être élaborée hors d'une interprétation du **ONT Contexte** dans lequel sont attendues les nouvelles fonctions (ou capacités) ou dans lequel la future forme est censée opérer. C'est cet ajout qui permet à cette première bisociation d'être en meilleure adéquation avec le domaine visé : la conception architecturale des systèmes artificiels complexes.

L'analyse lexicographique du terme *Contexte* (cf. annexe D.4 page 253), pourtant celui qui de prime abord nous semble le plus usité et approprié, révèle une très faible richesse synonymique et un emploi déconseillé par nos chers académiciens. Nous recommençons l'étude avec le terme *Environnement*, qui évoque également ou rappelle la notion de contexte en systémique ou en physique. À bien y regarder, contexte revêt plutôt une connotation temporelle, et environnement une connotation spatiale. Les deux sont indispensables dans la constitution d'une image mentale perceptive. Nous préférons conserver le terme de contexte (et aller à l'encontre de la recommandation de l'Académie française), plus répandu dans le domaine de l'architecture système.

Notons, comme J. Martin [Mar04], que plusieurs contextes, et pas seulement le contexte opérationnel (qui peut être multiple également) sont à considérer.

Encart 3.2

[Contextualiser à dessein]

Paul Valéry [Val19] commentant une des leçons de Leonardo Da Vinci, de son célèbre *Codex Urbinas Latinus 1270*, connu et publié sous le titre de *Traité de la Peinture (Trattato della pittura)* : « Pour te représenter un arbre, tu es forcé de te représenter le fond sur lequel il se détache ». Cette citation a été reprise et mise en lumière dans les travaux de Jean-Louis Le Moigne :

Appauvrir en divisant	Enrichir en contextualisant
Découper l'objet	Eclairer le projet
La modélisation Analytique (L'analyse, selon R. Descartes)	La modélisation Systémique (Le Disegno, selon L de Vinci)
<i>Pour te représenter un arbre, il est rationnellement nécessaire de le décomposer en un tas de sciure</i>	<i>Pour te représenter un arbre tu es forcé de te représenter quelque sorte de fond sur lequel il se détache</i>
<i>Disjoindre = Décontextualiser</i>	<i>Conjoindre = Contextualiser</i>

Le **ONT Concept** reste dans cette première version la fonction de transfert, ou de passage de la fonction vers la forme.

Nous reprenons les huit activités fondamentales du FBS initial, mais en les particularisant ou en les modifiant pour les adapter à ce paradigme de la conception architecturale. En particulier, toutes les activités sont désormais relatives et dépendantes des contextes considérés. Cette entière relativité et dépendance au contexte est un ajout notable de notre proposition de paradigme, le distinguant des deux autres dont il est issu. Nous pensons que c'est un élément essentiel à prendre en compte lors d'une conception architecturale, qui ne saurait se faire hors sol, mais bel et bien dans un, ou des contextes donnés.

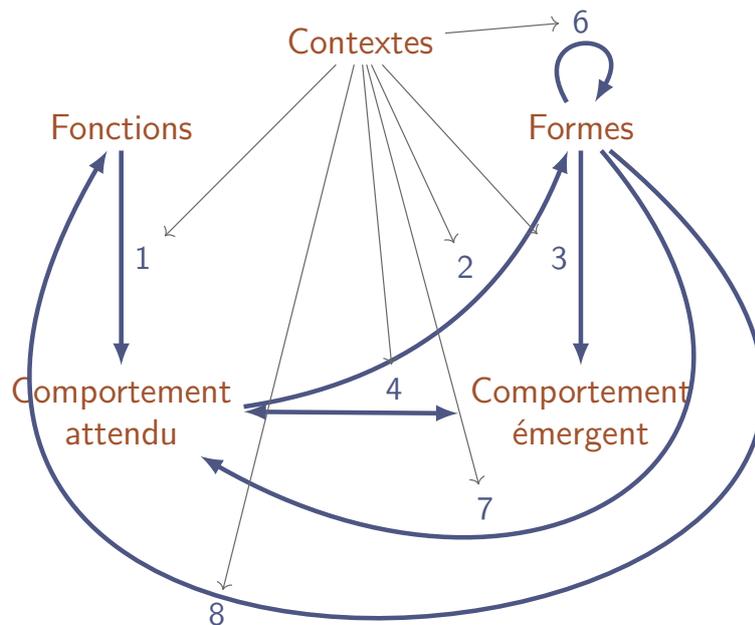


Figure 3.10: Paradigme simplifié $(FB)^2(C)^2$: les activités d'élaboration

- La **ACT Clarification** **Activité 1 :** $(Contextes), Fonctions \rightarrow Comportement\ attendu$
 Exprimer le comportement attendu en regard des fonctions, permet d'éclairer, d'éclaircir ces fonctions ; ceci étant encore plus si nous nous plaçons dans une approche capacitaire, plutôt que fonctionnelle. En reprenant la définition du DoD [DoD12] (c.-à-d. *The ability to achieve a desired effect under specified (performance) standards and conditions through combinations of ways and means (activities and resources) to perform a set of activities.*), nous pourrions naïvement poser que la clarification consiste à spécifier les effets désirés des capacités envisagées relativement au contexte, soit en suivant des standards et des conditions de performances spécifiés. La *formulation*, terme employé dans le FBS de J. Gero, nous semblait trop générale, et nous préférons ici employer le terme de « *clarification* », cette dernière contribuant à la *formulation*.
- La **ACT Proposition** **Activité 2 :** $(Contextes), Comportement\ attendu \rightarrow Formes$
 Le passage vers la forme s'inscrit dans le processus de conception architecturale dont nous avons vu qu'il est itératif, basé sur des ensembles de solution (non réduit à un singleton !), globalement convergent, localement successivement divergent puis convergent. Le terme de synthèse employé par J. Gero nous apparaît donc un peu trop définitif, et ne rend pas compte de ce côté incertain et flou en amont de la démarche architecturale. Ici le terme de « *proposition* » nous semble plus approprié, car il rend compte :

- du caractère hypothétique de la forme : il ne s'agit pas, dès le début, de la forme finale qui sera agréée (ce qui pourrait alors correspondre à une synthèse, ou tout du moins à un compromis), mais d'une hypothèse de travail, bref une proposition ;
- de son caractère multiple (*set-based*) : plusieurs formes peuvent coexister, et ainsi constituer la proposition courante ;
- de son caractère incertain, flou ; la forme peut n'être qu'une simple esquisse, ébauche, idée.

La **ACT Simulation**

Activité 3 : (*Contextes*), *Formes* → *Comportement émergent*

Il ne faut pas restreindre ici le terme de simulation à l'usage d'un modèle exécutable par des moyens informatiques. Il faut lui (re)donner sa signification en tant que cognition incluant toute forme de délibération basée sur un modèle [LM90], ici de la forme dans son ou ses contextes.

L' **ACT Évaluation**

Activité 4 : (*Contextes*), *Comportement attendu* ↔ *Comportement émergent*

Elle compare le comportement émergent issu d'une simulation de la ou des formes (activité 3) avec le comportement attendu (résultant de l'activité 2), et ainsi fournit des éléments d'aide à la décision pour statuer sur la validité de la solution (une contribution à la validation d'architecture).

Nous préférons adopter le terme de *modification* plutôt que celui de *reformulation* utilisé dans le FBS de J. Gero. Modification a un sens plus large et subsume les sens suivants :

- la *reformulation* : l'objet considéré n'est pas changé, mais il est exprimé, représenté, bref modélisé différemment ;
- l'*évolution* : l'objet qui était dans un certain état a changé pour atteindre un nouvel état, sans que pour autant nous soyons capables d'explicitement ce qui est advenu lors de la transition ;
- la *transformation* : l'atteinte d'un nouvel état de l'objet considéré est le résultat explicite d'une opération, ou d'une succession ou d'un enchevêtrement d'opérations.

ACT Mod. Forme,
Modification de la
Forme

Activité 6 : (*Contextes*), *Formes* → *Formes*

La proposition courante est modifiée. Dans le cadre du FBS de J. Gero, cela se limitait à faire évoluer la forme afin mieux *coller* au comportement attendu. Ici, la modification de la forme peut revêtir différents aspects :

- une reformulation de la forme courante, c.-à-d. une nouvelle expression, peut-être plus précise, peut-être en changeant de perspective ;
- une reconsidération et une évolution de l'ensemble des formes, soit divergente (augmentation de la cardinalité des possibles), soit convergente (réduction de la cardinalité des possibles) ;
- une transformation de la forme, en la manipulant au travers d'opérateurs, explicites ou non.

ACT Mod. Comp.,
Modification
comportementale

Activité 7 : (*Contextes*), *Formes* → *Comportement attendu*

Sans changer les capacités, leurs effets ou le comportement attendu peuvent être modifiés relativement à la connaissance accrue de la forme. Par exemple, le recours à une technologie de reconnaissance vocale au niveau de la forme, pourra entraîner une modification de l'usage et du comportement de certains protagonistes impliqués dans la capacité, sans pour autant changer cette capacité.

ACT Mod. Capa.,
Modification
capacitaire

Activité 8 : (Contextes), Formes → Fonctions

En creusant notre connaissance de la forme, nous pouvons être amenés à remettre en cause les capacités que nous cherchons à fournir et ainsi les modifier. De nouveau, cette modification peut se traduire par différentes actions :

- une reformulation des capacités établies, et ce potentiellement suivant différents aspects (à titre d'exemple, évoquons une amélioration de la précision, ou une décomposition plus fine des capacités, un ordonnancement et un fractionnement temporel des capacités – *capability planning* –, raisonnement par incréments capacitaires...);
- une évolution ou une transformation des capacités qui prendrait en compte certaines connaissances accumulées sur le travail de proposition ou de modification de la forme.

Une dernière activité était présente dans le FBS de J. Gero, la documentation. Nous la reprenons avec quelques modifications significatives. Nous le nommons **ACT** Description (Activité 5), et non documentation. À la fois pour lui donner un sens plus large, et à la fois pour rallier la terminologie standard (la norme ISO/IEC/IEEE 42010 :2011 [ISO11] porte explicitement sur la *description* d'architecture). Cette description ne se restreint pas à une représentation de la forme, mais embrasse l'intégralité des entités manipulées pour l'élaboration de l'architecture, à savoir fonctions, comportements et formes, afin de donner à cette représentation toute l'intelligibilité possible.

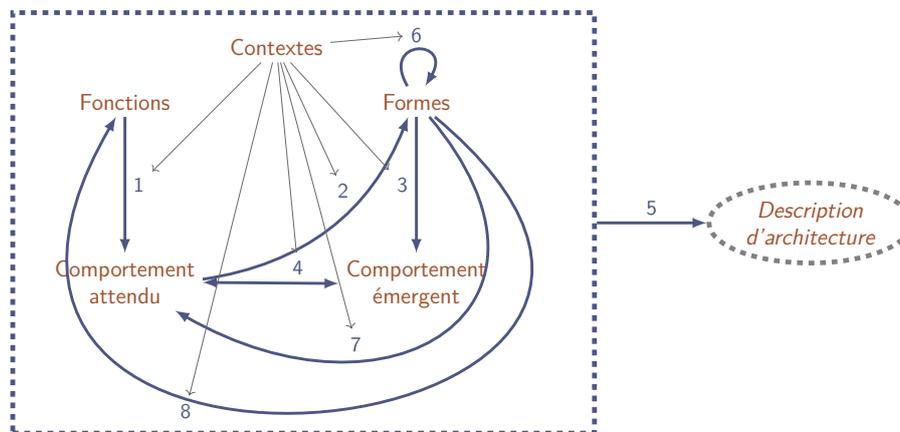


Figure 3.11: Paradigme simplifié $(FB)^2(C)^2$: la description d'architecture

3.3.2 Paradigme augmenté

Ce premier paradigme recèle cependant encore certaines insuffisances. Deux nous apparaissent comme majeures. D'une part, l'établissement des fonctions ou des capacités est déjà le résultat d'une activité, elles ne se révèlent pas *ex nihilo*. Dans le FBS de J. Gero, une même activité, l'activité de formulation, permettait le passage des exigences vers les fonctions et puis vers le comportement attendu. Ici cela est peu probant. Premièrement cela suppose la constitution préalable d'une base d'exigences sur laquelle s'appuyer. Or, comme noté par J. Martin, l'architecture ne suit pas forcément causalement l'ingénierie des exigences [Mar16]¹². Au contraire, la démarche architecturale peut alimenter et consolider la constitution de la base

12. Nous désignerons par ingénierie des exigences le processus de l'ingénierie système qui vise à établir une base d'exigences vérifiée, validée et justifiée pour l'objet d'intérêt.

d'exigences. D'autre part, toujours appuyé par J. Martin [Mar16], le terme d'exigences tel quel est trop flou : s'agit-il d'exigences posées par l'acquéreur, d'exigences système ? Deuxièmement, englober dans une même activité le passage de supposées exigences vers la détermination de fonctions ou de capacités, et le raffinement de ces fonctions ou capacités en un comportement attendu nous semble un raccourci rapide : elles sont de nature différente, véritable transformation d'un univers vers un autre dans un cas, raffinement et éclaircissement dans l'autre. D'autre part, définir le concept comme étant uniquement la transformation de la fonction en la forme nous paraît trop restrictif. Une des dérives serait de limiter la conception architecturale, et plus particulièrement l'élaboration de la forme à un simple jeu d'allocation des fonctions sur les éléments constitutifs de ladite forme. Cela restreindrait cette activité à être essentiellement analytique (en contradiction avec le terme choisi de J. Gero qui parle de synthèse !) et potentiellement faussement rationnelle¹³.

Pour pallier ces déficiences, une version augmentée du paradigme est élaborée, dénotée GC^3FB^2 , pour (*Goal, Contexts, Concept, Capabilities, Forms, Expected Behaviour, Emergent Behaviour*) (cf. figure 3.12).

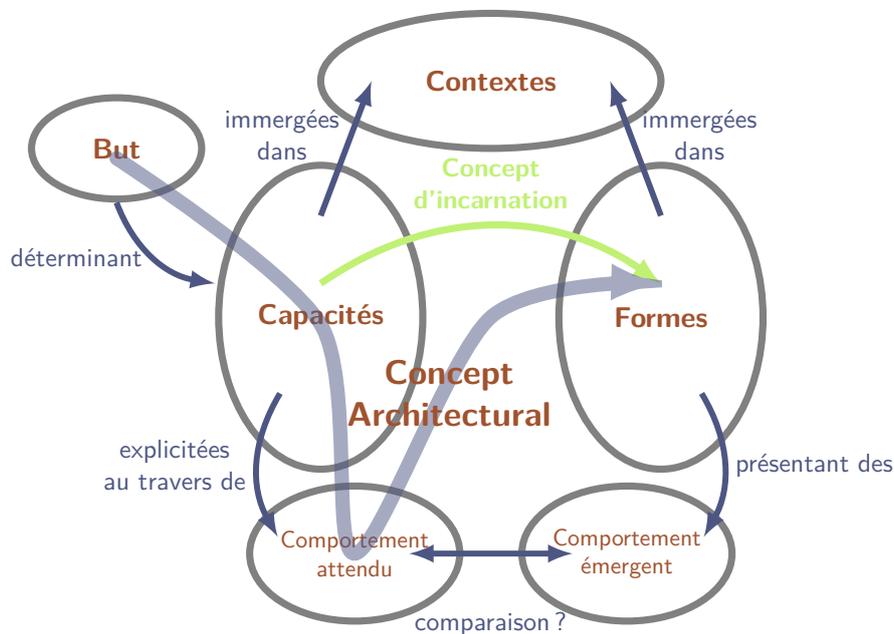


Figure 3.12: Paradigme augmenté GC^3FB^2

Ce qui nous amène à cette nouvelle définition d'une architecture :



Définition 3.8

[Architecture (paradigme augmenté)]

Une architecture est la détermination de capacités à atteindre, répondant à un but précis, explicitées au travers d'un comportement attendu, incarnées dans des formes présentant des comportements émergents, le tout dirigé et tenu par un concept, en considérant ses capacités et ses formes immergées dans les différents contextes relatifs à l'opportunité considérée.

13. Certain concepteurs pourraient avoir la tentation de se satisfaire d'une allocation, sans forcément avoir conscience qu'il s'agit d'une parmi toutes les allocations possibles ou explorer cet espace des possibles, et justifier ainsi leur architecture par la seule complétude de leur *table d'allocation*.

Le **ONT But** est ajouté comme élément externe (à l'architecte). Il désigne la finalité à atteindre, cette finalité étant détenue par des parties prenantes externes (le client, le sponsor, l'autorité détentrice...). Il constitue donc l'intention impérative et le substrat de départ de la conception architecturale. Il nous semble essentiel d'*extraire* cet élément afin de lever l'ambiguïté qui subsistait dans le FBS de J. Gero sur le concept de fonction : finalité ou moyen ? (dit autrement réponse à la question « *Pourquoi ?* » ou réponse à la question « *Pour quoi faire ?* »)

La **ONT Capacité** est définitivement adoptée. Elle est déjà une première traduction de la finalité à atteindre, et donc participe de la conception architecturale : pour atteindre le but, quelles capacités, ou quelle combinaison de capacités dois-je établir ? Ce côté capacitaire permet, nous semble-t-il, de mieux individualiser l'opportunité considérée, surtout en forçant sa contextualisation.

Exemple : le pont

Reprenons l'exemple du pont. Sa traduction en terme fonctionnel (« *Permettre aux personnes, aux véhicules, aux trains... de traverser d'un côté à l'autre* ») est anonyme et générique. Elle est applicable à n'importe quel pont, sans avoir besoin de la particulariser ou la contextualiser. En revanche, la capacité pour les habitants de Malmö de venir travailler à Copenhague, ou réciproquement la capacité des Danois d'aller habiter à Malmö, le tout pour un prix de navettage abordable, ont permis d'atteindre un objectif de rééquilibrage économique et social, propre au contexte particulier où a été érigé le Øresundsbron.

Le concept est maintenant élargi. Il capture la fonction de transformation ou de passage qui part du **ONT But** et qui va jusqu'à son incarnation dans des **ONT Formes**, en passant par les **ONT Capacités**, traduction du but final assigné en des objectifs pour l'architecture, clarifié par des **ONT Comportements attendus**. Il prend maintenant le nom de **ONT Concept architectural** pour le distinguer. Le précédent concept, c.-à-d. la fonction de transfert de la fonction, ou plutôt des **ONT Capacités** aux **ONT Formes**, est conservé. Il saisit comment les capacités sont incarnées dans des formes, et à ce titre est renommé **ONT Concept d'incarnation**.

Exemple : le programme Apollo

Avant même de s'en servir dans un cadre de conception architecturale, ce paradigme (le GC^3FB^2) peut tout simplement servir à révéler et communiquer l'architecture d'un système ou d'une entreprise existants ou passés. Illustrons cela avec le programme Apollo.

- **ONT But** : Il donné de manière très claire par l'ancien président des États-Unis, John F. Kennedy, lors de son célèbre discours à Rice University du 12 septembre 1962 : "[...] we choose to go to the Moon in this decade and do the other things, not because they are easy, but because they are hard [...]" [Ken62].
- **ONT Contexte** : Il prend ici diverses perspectives ou dimensions. Tout d'abord le, ou plutôt les contextes physiques (les différents environnements auxquels la mission sera confrontée) : l'atmosphère (et ses différentes couches), le vide spatial, l'environnement lunaire. À cela, il faut également rajouter d'autres contextes, comme le contexte politique (guerre froide, courses à l'espace entre les deux blocs), le contexte scientifique et technologique (connaissances et retours d'expériences limités sur l'ingénierie des systèmes spatiaux, la vie de l'homme dans l'espace).
- **ONT Capacité** : À très haut niveau, nous pouvons condenser et déterminer les deux capacités majeures : « *Amener un homme (ou un équipage) sur la Lune* » et « *Le (ou les) ramener vivant(s) sur Terre* ».

Exemple : le programme Apollo(suite)

- **Forme** : le programme Apollo est ce qui a permis de concrétiser le rêve américain édicté par John F. Kennedy. La documentation relative à ce programme décrivant comment il a été constitué est pléthorique. Contentons-nous de mentionner que cela comprend de nombreux artefacts (lanceurs, engins spatiaux, engins lunaires...), des installations (dont entre autres le fameux Centre Spatial Kennedy – *John F. Kennedy Space Center* ou KSC – connu aussi sous la dénomination de Cape Canaveral).
- **Comportement émergent** : De nombreuses expériences, simulations et recherches ont été conduites pour comprendre, aider à choisir les bonnes options et ainsi permettre la validation de l'architecture. Le memorandum technique réalisé en 1996 lors d'un symposium [Man66] offre une synthèse et expose certains résultats.
- **Concept architectural** : Comme mentionné par E. Crawley durant un symposium de la NASA [Cra09], le concept d'architecture tient (entre autres) dans la résolution de la contradiction, et donc du compromis entre masse (IMLEO^a) et risque.
- **Concept d'incarnation** : En rupture avec les concepts initiaux proposés par W. von Braun et par les Soviétiques (un seul engin spatial couvrant toutes les fonctions et effectuant l'intégralité de la mission), nous pouvons affirmer qu'ici le concept de concrétisation ou l'incarnation est *modulaire*. La solution est constituée de différents modules, chacun couvrant des aspects bien spécifiques de la mission : *Command and Service Module, Lunar Module...*

a. Initial Mass in Low Earth Orbit.

Comment les activités du précédent paradigme $((FB)^2(C)^2)$ sont-elles transposées ou modifiées dans ce paradigme augmenté (GC^3FB^2) ? L'adoption dans ce paradigme augmenté du concept de **Capacités**, au détriment de celui de **Fonctions** impose quelques mises à jour mineures dans le libellé des activités des bases. En revanche, l'incorporation d'un **Concept architectural** qui s'étend *tout le long*, influe sur les différentes activités. Chaque activité s'effectue suivant le ou les concepts architecturaux courants, et l'activité elle-même va potentiellement modifier ou mettre à jour ce concept architectural.

Au passage, nous adoptons la vision ensembliste (*set-based*) pour les concepts de notre ontologie, c.-à-d. que pour chacun de ces concepts, la matière sur laquelle travaille le concepteur est un ensemble de possibles ou d'alternatives, et non un seul objet.

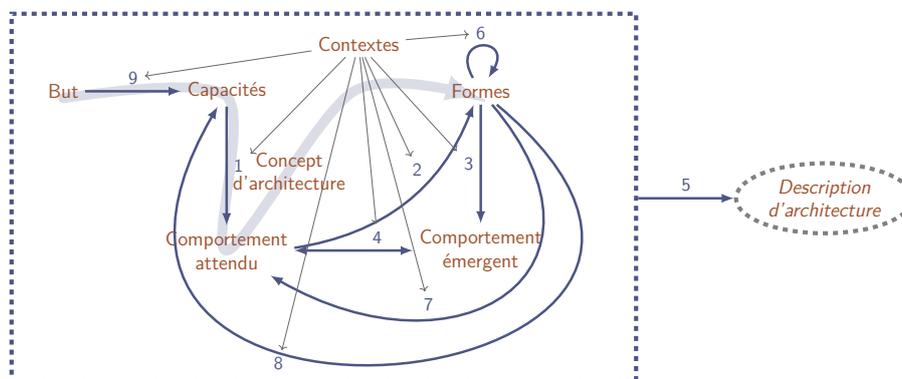


Figure 3.13: Paradigme augmenté GC^3FB^2 : toutes les activités

ACT	Clarification	<p>Activité 1 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}), \{ \textit{Capacité} \}$ $\rightarrow \{ \textit{Comportement attendu} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}$
ACT	Proposition	<p>Activité 2 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}), \{ \textit{Comportement attendu} \}$ $\rightarrow \{ \textit{Forme} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}$
ACT	Simulation	<p>Activité 3 :</p> $\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Forme} \} \rightarrow \{ \textit{Comportement émergent} \}$
ACT	Évaluation	<p>Activité 4 :</p> $\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Comportement attendu} \} \leftrightarrow \{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Comportement émergent} \}$
ACT	Description	<p>Activité 5 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \textit{But}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}, \{ \textit{Capacité} \}, \{ \textit{Comportement attendu} \},$ $\{ \textit{Forme} \}, \{ \textit{Comportement émergent} \}) \rightarrow \textit{Description}$
ACT	Mod. Forme	<p>Activité 6 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}), \{ \textit{Forme} \} \rightarrow \{ \textit{Forme} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}$
ACT	Mod. Comp.	<p>Activité 7 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}), \{ \textit{Forme} \}$ $\rightarrow \{ \textit{Comportement attendu} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}$
ACT	Mod. Capa.	<p>Activité 8 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}), \{ \textit{Forme} \} \rightarrow \{ \textit{Capacité} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}$

L'élargissement des entités de l'ontologie de base se traduit par une augmentation des activités de base. En particulier :

ACT	Détermination	<p>Activité 9 :</p> $(\{ \textit{Contexte} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}), \textit{But} \rightarrow \{ \textit{Capacité} \}, \{ \textit{Concept}_{\textit{architecture}} \}$ <p>Cela consiste à identifier et sélectionner les capacités, voire à les ordonner temporellement, et ainsi cadrer les objectifs capacitaires de l'architecture. La littérature évoque souvent les termes d'<i>analyse capacitaire</i>. Nous avons volontairement évacué ce terme d'analyse, cette activité ne se bornant pas à découper, ou à parcelliser le but ultime en une énumération de capacités.</p>
-----	---------------	--

Avec ce paradigme augmenté (GC^3FB^2) nous avons atteint un stade plus complet, mais encore insatisfaisant. Plusieurs manques viennent l'entacher :

- une meilleure prise en compte du contexte (il n'y a pas d'activité pour le capturer ou le faire évoluer) ;
- une meilleure prise en compte du temps et l'enchaînement des différentes activités. Nous disposons d'une panoplie d'activités, mais il y a bien peu d'indications sur comment les enchaîner et comment faire converger l'ensemble vers une *bonne* solution.

L'étude du paradigme proposé par D. Claeys va élargir notre vision d'un paradigme de la conception architecturale, nous apporter des réponses aux manques identifiées, et ainsi permettre d'enclencher une deuxième bissociation qui aboutira à notre proposition finalisée de paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes.

3.4 Le paradigme (analytico) systémique de D. Claeys

D. Claeys s'interroge sur ce qu'est la conception architecturale. Il constate l'absence de modèles théoriques et la faiblesse épistémologique, posant problème pour un enseignement valide de cette matière. Sa thèse [Cla13a] établit « *un modèle (analytico)systémique du processus de (co)conception qui vise l'architecture.* »

Il part du constat que l'architecte *ne fait pas* l'architecture (il ne la définit pas), mais la *vise*. Ici D. Claeys donne à architecture son sens de discipline, et non une propriété intrinsèque et ontologique des bâtiments (*l'architecture d'un bâtiment*), distinction que nous avons déjà posée dans le chapitre 1.2.

[...] les architectes ne font pas *l'architecture*, ils construisent *des architectures*. Par contre, lorsqu'ils conçoivent ou qu'ils construisent *des architectures*, ils *visent* l'architecture. Le concept d'architecture désigne donc un domaine de connaissances, construit et sans existence réelle, tandis que *les architectures* désignent des édifices. Entre les deux, nous situons la conception architecturale qui vise le domaine, pour concevoir les édifices. ([Cla11])

Nous nous proposons ici de faire une synthèse de son théorique. Elle sera particulièrement éclairante et inspirante pour élaborer notre paradigme. Nous effectuons cette synthèse des différents concepts de son modèle en les présentant dans un ordre tenant d'une sérialisation aussi neutre que possible, et non d'une explication rhétorique ou pédagogique. Pour cela nous ne pouvons qu'inviter le lecteur à s'approprier la thèse de D. Claeys [Cla13a], publiée maintenant sous forme d'un ouvrage [Cla13b].

Avant de rentrer dans le vif du sujet, indiquons quelques postulats et postures adoptés par D. Claeys.

Le préfixe (co) Il est systématiquement ajouté aux termes de conception, concepteur (un concepteur conçoit rarement seul, et fait toujours partie d'un groupe constitué de différentes parties prenantes interagissantes et influençantes). De même, les opérations proposées (ce que nous avons nommé activité) seront des (co)opérations.

Une posture constructiviste Même si cela n'est pas directement et explicitement assumé, le travail de D. Claeys s'inscrit dans une épistémologie constructiviste. Pour nous en convaincre, son concept central de réel augmenté (voir ci-après) en est le témoignage : « [...] *une difficulté incontournable est cristallisée dans la superposition entre le réel et la (re)présentation que nous en avons. Les modalités au travers desquelles il apparaît à notre conscience ne sont que le résultat de tentatives de superpositions répétées, que nous projetons à partir des actes cognitifs de notre monde intérieur. L'homme construit donc un réel que nous pouvons qualifier d'augmenté et qui est appelé ici R^+ , contre lequel, impertinent, le réel résiste dès que nous le provoquons.* » .

Une posture dialogique Chère à Edgar Morin¹⁴, c'est une posture pour affronter le complexe. D. Claeys s'en servira pour proposer une vision analytico-systémique de son modèle.

Un principe trialogique D. Claeys met en scène un jeu d'oppositions entre trois pôles antagonistes et met en œuvre une trialectique comprenant trois dialogiques : c'est une extension à trois termes de la dialogique (à deux termes). D. Claeys introduira nombre de trialogies dans son modèle théorique (la plupart des concepts vont par trois : trois espaces, trois réalités, trois niveaux d'organisation, trois modèles de (co)conception. . .).

14. « *Le principe dialogique signifie que deux ou plusieurs logiques différentes sont liées en une unité, de façon complexe (complémentaire, concurrente et antagoniste) sans que la dualité se perde dans l'unité.* » Le principe dialogique « *unit deux principes antagonistes qui sont indissociables et indispensables pour comprendre une même réalité* ».

Ainsi, le paradigme (analytico)systemique de D. Claeys peut être condensé de la sorte :

Le réel augmenté Adoptant une posture constructiviste, il pose la constitution par l'homme d'un réel dit augmenté dans lequel va se situer toute la démarche (co)conception architecturale. Cela sera son postulat primordial. Trois réalités (ou trois mondes, pour coller à la théorie des trois mondes de Popper), constituent ce réel augmenté :

R^+ le réel augmenté :

- **$R_{intersubj}$** la *réalité intersubjective* contenant une connaissance commune et partagée, autrement dit la « *noosphère* » ;
- **R_{subj}** la *réalité subjective* contenant ce que nos propres expériences et perceptions de la *réalité objective* produisent à travers le prisme de la *réalité intersubjective* ;
- **R_{obj}** la *réalité objective*, c.-à-d. le monde sensible dans lequel nous vivons, y compris nous-mêmes.

Des espaces

- **Esp_1** l'espace de l'architecturé, est un espace de perception qui concerne la réalité objective. Contenant les édifices, les habitants et les environnements, il est directement accessible. Il peut être décrit par des médias de représentations.
- **Esp_2** l'espace de l'architecturer, concerne la réalité subjective. Il est l'espace dans lequel sont effectuées les opérations qui permettent de produire des architectures lorsque le (co)concepteur vise l'architecture. Espace propre à un projet d'architecture en cours de conception, il renferme les modèles architecturaux, fruits du faire et fait imaginaire du (co)concepteur.
- **Esp_3** l'espace de l'architecture, ou espace architectural concerne la réalité intersubjective et la captation des connaissances (ici liées et centrées sur l'architecture). Espace de mise en œuvre des pensées, quasi inaccessible aux représentations, son existence est légitimée par le postulat de H. Simon [Sim69] énonçant que chacun est un concepteur par sa capacité à produire des artefacts et de construire des modèles abstraits.

La figure ci-après permet de synthétiser et représenter les différents concepts préliminaires du modèle théorique de D. Claeys.

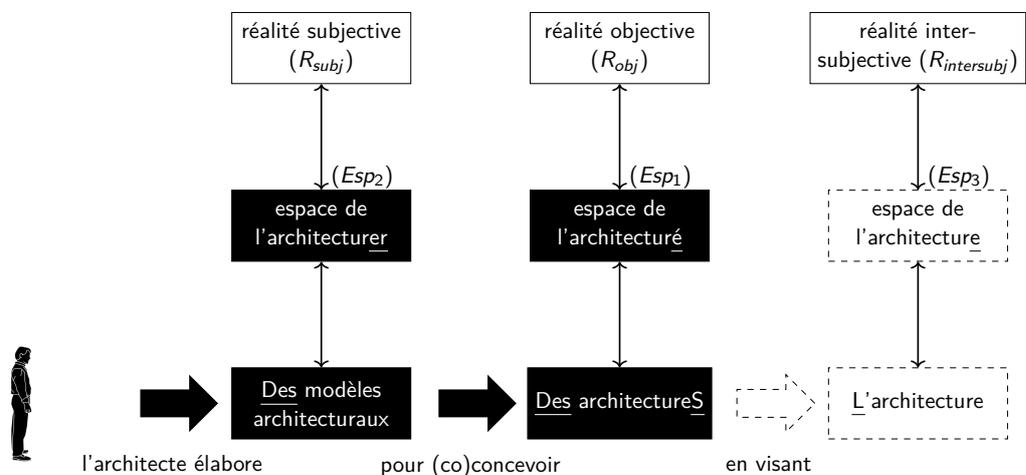


Figure 3.14: Réalités, espaces et architectures dans le modèle théorique de D. Claeys

Les niveaux du processus de (co)conception

le (co)concepteur itère afin de converger

il rétroagit sur le processus de (co)conception

Il affine son modèle

Il va distinguer et entremêler trois niveaux de modélisation heuristique des processus de (co)conception :

- un *modèle systémique général de (co)conception* visant l'architecture. Il porte la démarche globale, et permet d'ancrer les deux autres niveaux de processus. C'est une vision diachronique du processus ;
- un *modèle systémique du (co)concepteur (auto)réflexif*. C'est certainement là un des points les plus remarquables du modèle théorique de D. Claeys qui consiste à incorporer le concepteur lui-même dans le processus de conception, comme entité pensante et apprenante, observant le processus dont il fait lui-même partie tout en agissant sur lui. Sans statuer sur une posture anthropocentrée, son modèle n'oublie cependant pas la place déterminante de l'homme et il s'inscrit délibérément dans le cas 3 des caricatures de Jones (cf encart 1.3.1) ;
- un *modèle systémique (en) particulier de (co)conception* visant l'architecture. Ce niveau s'intéresse à un état particulier (une itération dirions-nous) dans le processus global de (co)conception. Il porte donc sur l'aspect synchronique du processus.

Nous nommerons ces différents modèles respectivement $MthP_{1/3}$, $MthP_{2/3}$ et $MthP_{3/3}$

le processus de (co)conception en général, $MthP_{1/3}$

Claeys va proposer un processus de (co)conception en général, synthèse des différentes contributions et théories en matière de conception architecturale. Nous pouvons condenser son essence dans les différents points qui suivent.

- Un écoulement temporel, l'élongation temporelle du processus, ponctué par des états (t_i) avec l'indice i variant de 0 à n . À chaque état intermédiaire (t_k) correspondra un modèle architectural M_k ponctuel. Une ligne du temps est une dimension fondamentale de tout processus de conception montrant son avancée ponctuée par une succession d'états (t_i).
- Une dialogique entre analytique et systémique, art et science.
- La séparation entre représentations internes (les images mentales du (co)concepteur) et les représentations externes à vocation médiatique.
- Une conjonction et une construction concomitante (zigzagante pourrions-nous dire) de l'« espace-problème » (quelles finalités, quelles contraintes...) et l'« espace-solution » (qui caractérise les différentes solutions potentielles qui voudront bien se montrer être satisfaisantes – *satisficing* [Sim69]).
- Deux réservoirs variables, l'un le *domaine des données* (Dom_d) contient les données prises en compte par le (co)concepteur, l'autre le *domaine des solutions satisfaisantes* (Dom_s). Ils sont tous les deux variables : pour le premier le (co)concepteur peut décider d'élargir ou de rétrécir le champ des données qu'il prend volontairement en compte ; pour le second il marque le côté collectiviste des solutions possibles et plausibles, réservoir qui peut s'élargir ou se rétrécir au gré de l'avancement du processus de (co)conception, refusant ainsi de se focaliser sur une solution unique.
- La succession de phases divergentes (élargissement, pensée créatrice, abduction) et convergentes (rétrécissement, pensée synthétique, déduction), parfois entrecoupées de période de latences (rien n'évolue significativement) et d'illumination (un bond significatif), tout en étant globalement convergentes (le (co)concepteur vise un état qui permettra de passer à la réalisation d'une solution).

Ces différents aspects se retrouvent dans la métaphore de l'hélicoïde convergent tel que schématisé par la figure ci-après.

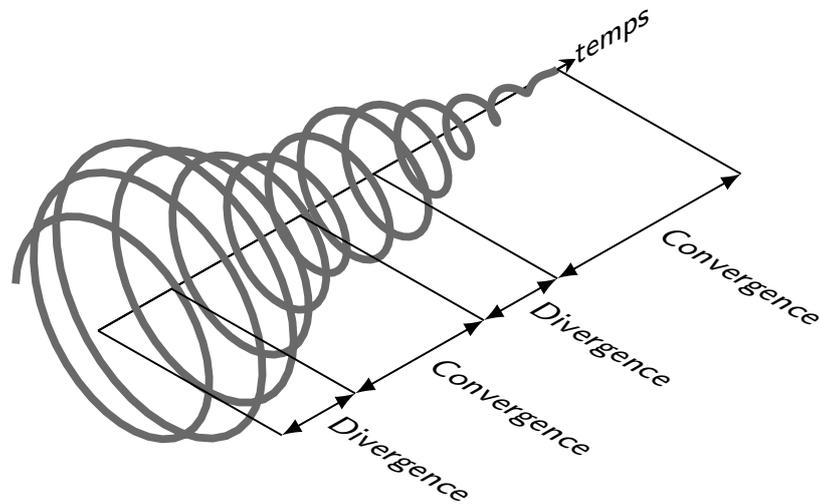


Figure 3.15: Modélisation du processus de (co)conception général $MthP_{1/3}$ (d'après [Cla13a])

Aparté

En guise d'aparté introductif, nous indiquons quelques principes génériques que va utiliser D. Claeys pour spécifier ces différents modèles de processus de (co)conception.

opérations,
opérandes et
résultats

- Le changement :
Cela peut être résumé en une formulation très simple : le processus consiste à effectuer des *opérations* agissant sur des *opérandes* produisant un *changement*.
 $Change_t = Opération_i(Opérande_i)$

ensemble, structure,
système

- Les niveaux d'organisations des modèles : Claeys distingue trois niveaux d'organisation ou de construction, qui sont des façons d'agréger les *données brutes* en un modèle :
 - l'ensemble (une collection d'éléments regroupés et distincts), correspondant à un niveau ou un point de vue dit *formel* ;
 - la structure (des éléments reliés entre eux), correspondant à un niveau ou un point de vue dit *structurel* ;
 - le système (des éléments reliés entre eux et qui en *profitent* pour interagir résultant ainsi en des émergences), correspondant à un niveau ou un point de vue dit *fonctionnel*.

questionnement

- Le questionnement : Claeys propose une typologie de questionnement pour appréhender et faire évoluer un modèle architectural.

Les opérandes
architecturaux

Ce sur quoi vont porter les opérations de la (co)conception architecturale.

l'environnement

- $Ctxt_i$ le contexte local. Reprenant un des arguments de la systémique (tout système ne peut être isolé de son contexte), et aussi quelque part les arguments d'une cognition située, tout modèle architectural (cf. ci-après) ne peut être détaché de son contexte local. Un état M_i du modèle architectural s'inscrit donc dans un contexte local $Ctxt_i$ (une réalité subjective R_{subj} de l'espace de l'architecturer Esp_2), ce même contexte s'inscrivant lui dans un contexte global

$Ctxt_{global}$ (une réalité intersubjective $R_{intersubj}$ de l'espace de l'architecture Esp_3). Un contexte se divise en une diversité de *dimensions* (spatiales, temporelles, culturelles...), a priori une infinité de découpes possibles pour le contexte global, et en un nombre fini n de dimensions pour le contexte local (partition du contexte global). Le choix et la valorisation relative de ces dimensions influenceront sur la manière de concevoir. Ce qui se traduit par la relation suivante :

$$M_i \subset Ctxt_i \subset Ctxt_{global},$$

avec $Ctxt_i = \{Dim_a, Dim_b, \dots, Dim_n\}$ et $Ctxt_{global} = \{Dim_1, Dim_2, \dots, Dim_\infty\}$

les images mentales
du concepteur

- M_i le modèle architectural. La représentation interne sur laquelle travaille le concepteur, ce sont les images mentales du projet d'architecture en cours. Ce travail de conception architecturale effectué dans l'espace de l'architecturer (Esp_2) est rythmé par des étapes, donc des états successifs. À chaque état t_i du processus, le modèle architectural M_i est (ré)actualisé intentionnellement par le (co)concepteur à l'aide d'opérations mentales (le modèle théorique proposera une taxinomie de ces opérations). Nous distinguerons les états suivants :

- M_0 état initial ;
- M_k état intermédiaire ponctuel ;
- M_{crit} état critique de pertinence, c.-à-d. un état ayant atteint une solution sous-optimale acceptable (la conception peut être arrêtée) ;
- M_n état final.

Ce modèle architectural s'étage sur trois niveaux d'organisations :

- $M_{i.1}$ modèle agrégatif, modèle dans lequel les informations sont organisées en Ensemble ;
- $M_{i.2}$ modèle statique, modèle dans lequel les informations sont organisées en Structure ;
- $M_{i.3}$ modèle dynamique, modèle dans lequel les informations sont organisées en Système.

les représentations
qu'il partage

- Md_i le média. Les images mentales ne peuvent à elles seules tenir lieu de projet d'architecture. Le concepteur se doit à certains moments d'externaliser, exhiber des informations, ne serait-ce que pour partager avec différentes parties prenantes. Il le fait au travers de représentations externes Md_i . À chaque état t_i du processus, une représentation externe Md_i du modèle architectural M_i est possible. De nombreuses modalités sont offertes pour exposer de telles informations en des médias : plans, schémas, dessins, esquisses ou croquis, supports écrits, supports oraux, supports vidéo, maquettes... .

Un modèle du
processus de
(co)conception

Ce modèle comprend un certain nombre d'opérations élémentaires aboutissant à des changements.

Un projet d'architecture est défini en tant que contexte de (co)opération particulier au cours duquel un (des) (co)concepteur (s) embraye(nt) un processus de (co)conception dans lequel un modèle architectural M_i est actualisé de nombreuses fois jusqu'à la fin du processus à l'aide d'opérations générales de (co)conception O_j . [...] un processus de (co)conception qui vise l'architecture est un processus spécifique au cours duquel le

(co)concepteur (co)opère une succession d'opérations générales de (co-)conception O_i sur un opérande global – le modèle architectural M_i – pour l'actualiser en vue de (co)opérer un changement Ch_i . [Cla13a]

1. les opérations architecturales

O_i (co)conception :

- O_0 (co)contextualisation :
une opération architecturale par laquelle le (co)concepteur actualise le contexte pris en compte autour du modèle architectural M_i .
- O_1 (co)composition :
une opération architecturale par laquelle le (co)concepteur (com)pose les éléments fondamentaux de son projet architectural en un ensemble pour atteindre ou actualiser un modèle agrégatif $M_{i,1}$.
- O_2 (co)construction :
une opération architecturale par laquelle le (co)concepteur pose ou adapte les structures de ses éléments du modèle architectural pour atteindre ou actualiser un modèle statique $M_{i,2}$.
- O_3 (co)régulation :
une opération architecturale par laquelle le (co)concepteur vis-à-vis d'aspects fonctionnels (ré)organise les éléments du modèle architectural pour atteindre ou (re)distribuer un modèle dynamique $M_{i,3}$.

2. les changements

Ch_i (re)conception :

- Ch_0 (re)contextualisation :
un changement apporté au contexte local $Ctxt_i$ du modèle architectural à l'aide d'une opération de (co)contextualisation O_0 .
- Ch_1 (re)composition :
un changement apporté au sous-modèle architectural agrégatif $M_{i,1}$ à l'aide d'une opération de (co)composition O_1 . Le point de vue formel du projet d'architecture est alors actualisé.
- Ch_2 (re)construction :
un changement apporté au sous-modèle architectural hiérarchique $M_{i,2}$ à l'aide d'une opération de (co)construction O_2 . Le point de vue structurel du projet d'architecture est alors actualisé.
- Ch_3 (re)distribution :
un changement apporté au sous-modèle architectural $M_{i,3}$ à l'aide d'une opération de (co)régulation O_3 . Le point de vue fonctionnel du projet d'architecture est alors actualisé.

3. les questionnements architecturaux :

Nous n'énumérerons pas ici les différents types de questionnements énoncés par D. Claeys, car trop liés au domaine de l'architecture des édifices. Notons simplement que sa taxinomie comprend des *meta*-questionnements concernant le contexte, l'espace, le temps, les dimensions et d'autres questionnements portant sur le point de vue formel, structurel ou fonctionnel du modèle architectural.

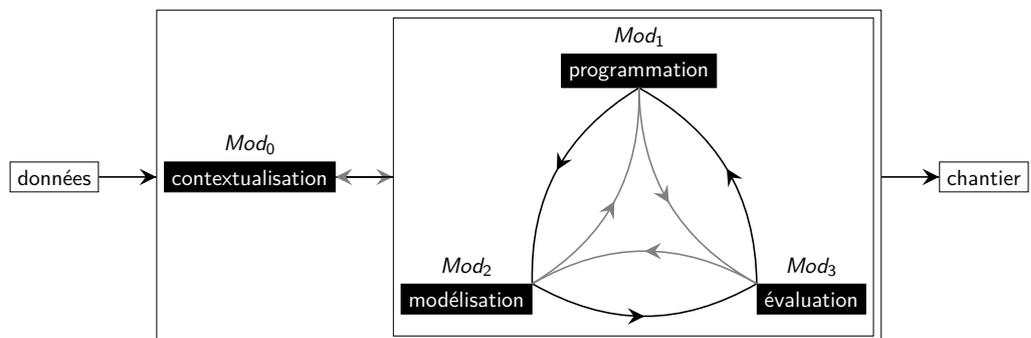
TABLE 3.7: Opérations et changements sur le modèle architectural (d'après [Cla13a])

les opérations	les opérandes	les changements
(co)contextualisation O_0 (phénoménologique, analytique et systémique)	contexte local $Ctxt_i$	re-contextualisation Ch_0
(co)composition O_1 (phénoménologique)	modèle agrégatif $M_{i,1}$	(re)composition Ch_1
(co)construction O_2 (analytique)	modèle statique $M_{i,2}$	(re)construction Ch_2
(co)régulation O_3 (systémique)	modèle dynamique $M_{i,2}$	(re)distribution Ch_3

Enfin il propose une organisation du processus de (co)conception en un certain nombre de *modules*¹⁵, correspondant chacun à un (sous-)problème à aborder par le (co-)concepteur. Ils ont au nombre de quatre¹⁶, chacun s'occupant d'un niveau ou un point de vue particulier du projet architectural :

- Mod_0 - $Ctxt_i$ contextualisation : Contextualiser le modèle architectural.
- Mod_1 - $M_{i,1}$ programmation : In-former l'espace architectural du projet.
- Mod_2 - $M_{i,2}$ modélisation : Construire la structure du modèle architectural.
- Mod_3 - $M_{i,3}$ évaluation : Étudier le fonctionnement du modèle architectural.

Ce qui donne lieu au modèle de processus suivant :


 Figure 3.16: Modélisation heuristique du processus particulier de (co)conception $MthP_{3/3}$ (d'après [Cla13a])

15. Ce nom est choisi comme une dialogique entre un point de vue analytique avec un découpage en étapes ou phases, et un point de vue systémique avec un enchevêtrement d'activités.

16. Nous reprenons bien sûr la dénomination à l'exact, même si celle-là nous apparaît parfois ambiguë ou prêtant à confusion.

un modèle du
(co)concepteur

Clays va utiliser les connaissances des neurosciences et de la théorie des systèmes pour tirer son modèle du (co)concepteur. Il vient enserrer le réel augmenté entre le réel¹⁷ et le réel mythique¹⁸. Il pose la (co)construction du réel augmenté résultant de la perception du réel (succession de stimulations et d'actions) et une succession d'opérations d'interprétation et de projection¹⁹ dans le réel mythique.

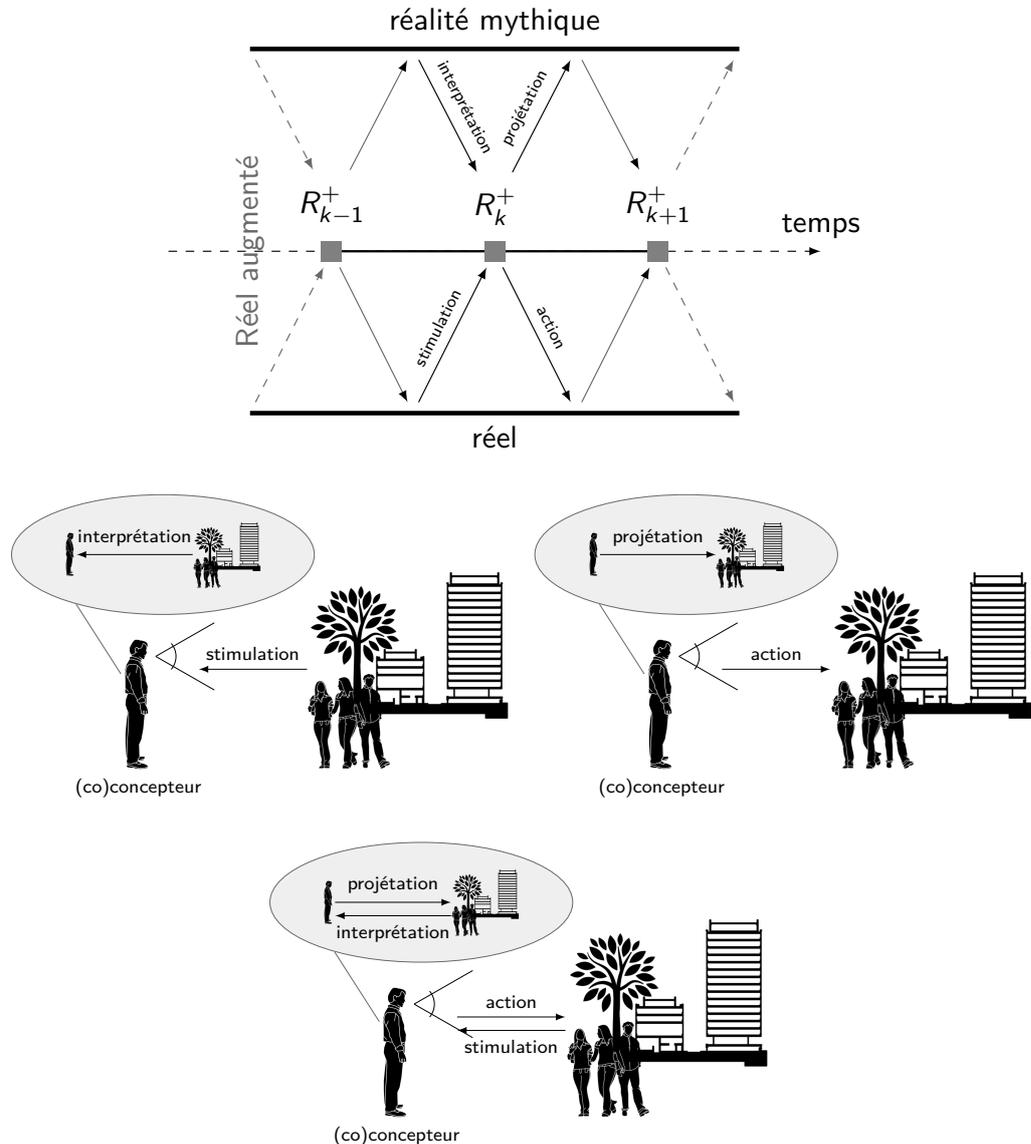


Figure 3.17: Les opérations cognitives de (co)construction du réel augmenté (d'après [Cla13a])

17. « [...] une des deux polarités dynamiques du réel augmenté [...]. Il est un au-delà du réel augmenté. Son existence est consciemment partagée, mais il ne peut être appréhendé qu'indirectement à partir des règles phénoménologiques. Le réel est à distinguer des réalités, dans le sens où il est indifférent à toutes les (re)présentations élaborées par le (co)concepteur qui gère celles-ci à travers les filtres cognitifs et autres réductions qui les affectent inévitablement. » [Cla13a].

18. « [...] la réalité mythique R_{myth} est un en deçà du réel augmenté inaccessible, inconscient et partagé (inter)subjectivement qui fournit au (co)concepteur des règles d'évaluation inconscientes des données de son (auto)référentiel dont les expressions conscientes sont les règles mythiques, et qui influence ses choix au cours du processus de (co)conception. » [Cla13a].

19. Néologisme utilisé dans le domaine de l'architecture dont le sens se situerait entre planification et conception. En fait, une traduction possible de *design* dans le monde de l'architecture.

De ces opérations cognitives de (co)construction du réel augmenté par des boucles aller-retour (stimulation-action, et interprétation-projétation), il construit une boucle cognitive (auto)réflexive du (co)concepteur comportant un certain nombre d'opérations portant sur modèle architectural M_i .

« Les opérations de (co)positionnements $O_a(M_i)$, de (co)questionnement $O_b(M_i)$, d'(auto)référence ou d'(auto)critique $O_c(M_i)$, de (co)évaluation $O_d(M_i)$ et de (co)évolution $O_e(M_i)$ sont (re)liées et (re)présentées à l'aide de la boucle (auto)réflexive (cf. figure 3.18). Celle-ci montre le chemin privilégié du processus (auto)réflexif du (co)concepteur à l'aide des flèches : début du processus → questionnement → (co)positionnement → (auto)référence → (co)évaluation → (co)évolution. Les autres liaisons montrent les pro/inter/rétroactions possibles à tout moment entre chacun de ces pôles.

Ainsi le (co)concepteur démarre le processus de (co)conception : il problématise le modèle architectural M_i en questionnant le positionnement. Si nécessaire, il provoque alors un (re)positionnement de celui-ci. De là, il analyse le modèle architectural ainsi que les interactions qu'il a avec lui en le (re)questionnant. Il opère ensuite une synthèse de l'état du modèle architectural à l'aide d'opérations d'(auto)référence. Enfin, il opère une évaluation (auto)critique et, si cette dernière est concluante, une application de l'opération de (co)conception $O_i(M_i)$ au modèle architectural M_i : celui-ci est alors (ré)évalué et (ré)évolutionné. » [Cla13a]

1. les opérations cognitives

- O_a (co)questionnement :
une opération cognitive par laquelle le (co)concepteur problématise le modèle architectural M_i en suscitant des questionnements.
- O_b (co)positionnement :
une opération cognitive menée par le (co)concepteur pour lui permettre de se situer dans le réel augmenté, et donc se rendre compte dans quel espace se situe les concepts qu'il entend manipuler et avec quelle logique ou avec quel type de raisonnement il va les aborder.
- O_c (auto)référence :
une opération cognitive menée par le (co)concepteur qui consiste à synthétiser toutes les données initiales, les résultats obtenus par l'usage des questionnements des modèles architecturaux et/ou d'organisations récurrentes d'informations en relations qui concernent le projet d'architecture en cours de (co)conception. Cette synthèse doit permettre d'avoir des éléments plus ou moins objectifs pour évaluer et décider de changements nécessaires à apporter au modèle architectural.
- O_d (co)évaluation :
une opération cognitive menée par le (co)concepteur pour opérer des choix par l'évaluation et la valorisation (ou non) des connaissances (organisées ou non) concernant la réalité augmentée en général, et le cadre particulier du projet architectural concerné.

- O_e (co)évolution :
une opération cognitive menée par le (co)concepteur qui, en fonction des choix qu'il fait, fait évoluer le modèle architectural M_i , c.-à-d. la (re)présentation qu'il se fait du projet d'architecture en cours de (co)conception.

2. les changements

De manière générique, un changement Ch_x apporté au modèle architectural M_i est le résultat de l'opération cognitive O_x sur le modèle architectural M_i . Nous retrouverons donc autant de changements que d'opérations cognitives.

- Ch_a (re)questionnement
- Ch_b (re)positionnement
- Ch_c (re)référence
- Ch_d (re)évaluation
- Ch_e (re)évolution

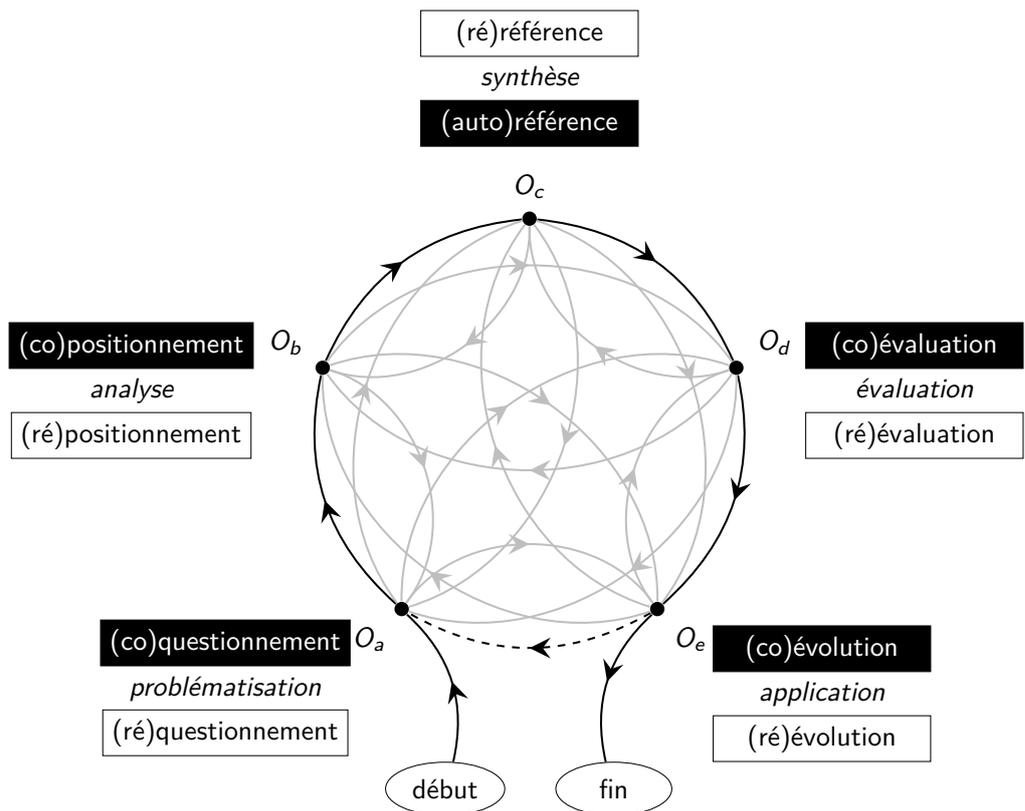


Figure 3.18: Modélisation heuristique de la boucle (auto)réflexive du processus de (co)conception $MthP_{2/3}$ (d'après [Cla13a])

En mettant tout ensemble, les différents modèles de processus se tissent ensemble pour former le modèle complet (cf. figure 3.19 page suivante) de (co)conception architecturale. Plus particulièrement, le $MthP_{2/3}$ et $MthP_{3/3}$ viennent s'accrocher sur le processus général $MthP_{1/3}$. Les différents artefacts sont produits le long de cette conception, dont la forme générale emprunte à l'hélicoïde convergent, avec localement des périodes de divergence suivies de périodes de convergence.

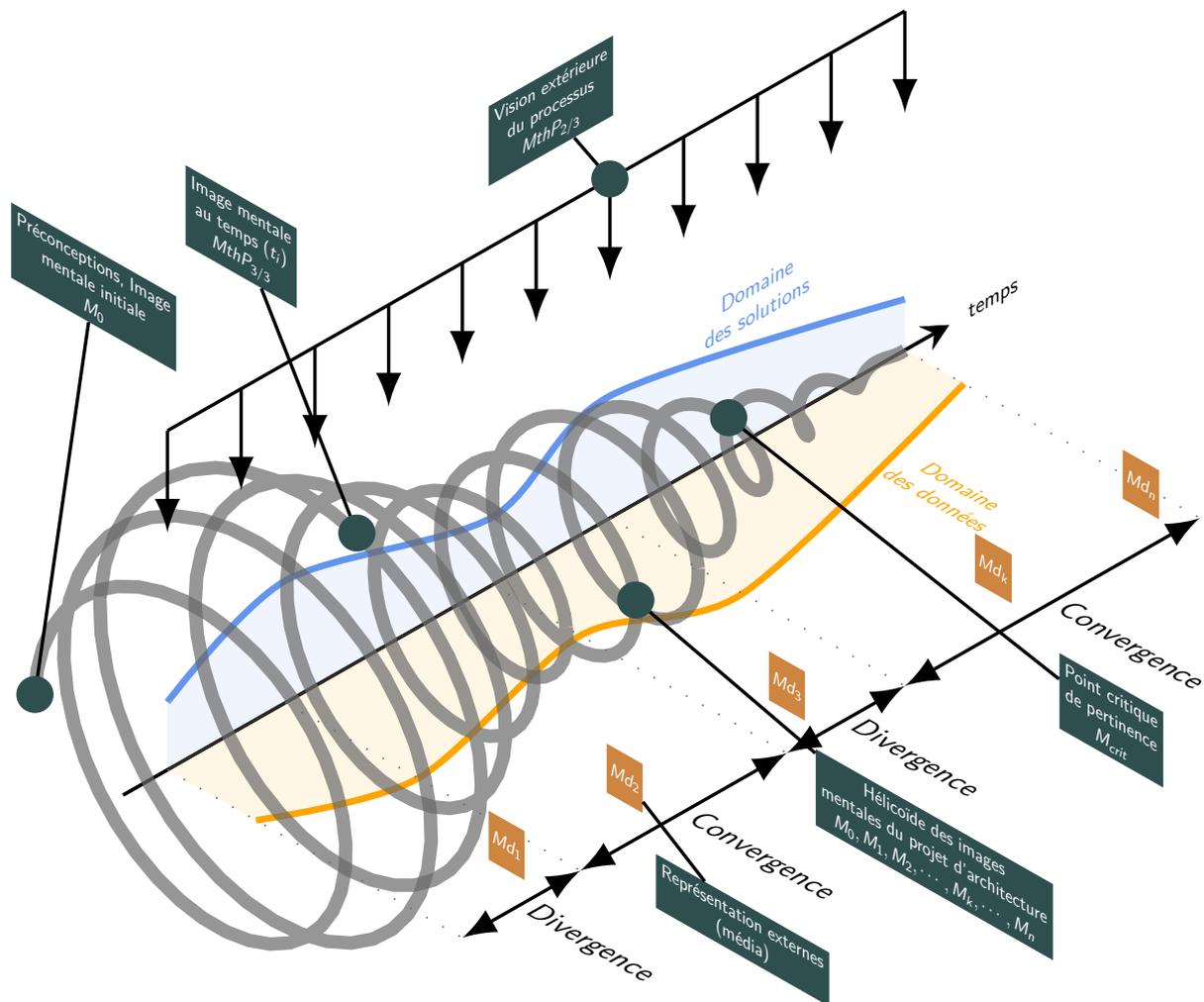


Figure 3.19: Vue générale du modèle théorique de processus de conception architecturale (d'après [Cla13a])

Si ce paradigme apporte des éléments remarquables qui nous permettront d'enclencher une deuxième bissociation, observons quand même qu'il est difficile à résumer en quelques grands principes ou en quelques règles.

3.5 Deuxième bissociation : $GC^3FB^2 \oplus$ Paradigme (analytico) systémique de D. Claeys

Une des avancées de ces deux paradigmes qui mérite d'être plus particulièrement notée tient dans l'introduction de la notion de *mondes*, d'*espaces*, de *réels*, afin ainsi de les contextualiser (les situer²⁰ dirions-nous, pour suivre la dénomination de J. Gero), évitant ainsi un côté *hors-sol* de leur paradigme. Si cela est implicite dans J. Gero avec son monde interprété et ses mécanismes d'interprétation et de mémoire constructive, l'inclusion du concepteur ou architecte dans une forme auto-réflexive est explicite chez D. Claeys.

20. Nous pourrions également qualifier le modèle théorique de Claeys de *situé*, dans le sens où il place la (co)conception (donc une forme de cognition) par rapport à des réels et par rapport à des formes de connaissances.

3.5.1 *Tempus rerum imperator*²¹

Nous enclencherons la bissociation à partir de cette idée. En revanche, un aspect qui semble être absent du paradigme de J. Gero, est la référence explicite au temps. Galle en avait fait une critique remarquant que la conception se réfère à un artéfact non encore réalisé et *non existant*²². Chez D. Claeys, la référence au temps est liée au processus de (co)conception : son élongation, ses différents états et itérations, l'hélicoïde des modèles. . .

Viser l'architecture dans un contexte de systèmes artificiels complexes, ne saurait se faire sans une référence explicite au temps. En tant qu'*inventeur du futur*, l'architecte part toujours d'une situation établie, conséquente d'une certaine histoire passée. Sa proposition tient le plus souvent dans des modifications et des évolutions de choses (pré)existantes. Et quand bien même elle consiste en une innovation ou une création de toute pièce, celle-ci, en tant que système, s'insère dans un(des) sur-système(s), un(des) écosystème(s), et interagit par l'entremise d'interfaces avec d'autres systèmes actuels ou en devenir.

« *Qui sait le passé peut conjecturer l'avenir.* » (Bossuet, La politique tirée de l'Écriture Sainte (1709))

« *Ce n'est qu'avec le passé qu'on fait l'avenir.* » (Anatole France, Le livre de mon ami (1885))

L'architecture est une œuvre du temps sur le temps. Ceci étant dit, nous nous trouvons dans un état de perplexité comparable à celui de Saint Augustin :

« Qu'est-ce en effet que le temps ? »

« Qu'est-ce donc que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais ; mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, je ne le sais plus. Pourtant, je le déclare hardiment, je sais que si rien ne passait, il n'y aurait pas de temps passé ; que si rien n'arrivait, il n'y aurait pas de temps à venir ; que si rien n'était, il n'y aurait pas de temps présent. Comment donc, ces deux temps, le passé et l'avenir, sont-ils, puisque le passé n'est plus et que l'avenir n'est pas encore ? Quant au présent, s'il était toujours présent, s'il n'allait pas rejoindre le passé, il ne serait pas du temps, il serait l'éternité. Donc, si le présent, pour être du temps, doit rejoindre le passé, comment pouvons-nous déclarer qu'il est aussi, lui qui ne peut être qu'en cessant d'être ? Si bien que ce qui nous autorise à affirmer que le temps est, c'est qu'il tend à n'être plus. » ([Aug93])

Nous nous inspirerons de son paradigme temporel, et sa vision du temps comme contingence de notre existence (le côté éphémère et changeant de toute *existence*), laissant de côté la portée philosophique ou théologique, pour en extraire un côté opérant. Nous reprenons et interprétons ainsi un des aspects essentiels du temps chez Saint Augustin.

De son interrogation sur les trois formes du temps que sont le passé, le présent et le futur, nous gardons la conjonction de trois plans :

Memoria la mémoire et les souvenirs (le présent du passé). Au-delà du côté situé de la conception architecturale, l'architecte entretient et accède à une mémoire, individuelle (réalité subjective chez D. Claeys) ou collective (réalité intersubjective chez D. Claeys).

Contuitus la vision, l'attention (le présent du présent). L'architecte 'regarde' le monde autour de lui pour l'interpréter. Il le perçoit pour en construire une image mentale, bref un modèle, en incessante évolution.

21. « *Le temps, maître de toute chose.* »

22. "However, at the time a given artefact was designed, that artefact had not been made." [Gal09].

Expectatio l'expectative, l'attente (le présent du futur). L'architecte propose une, ou plutôt, des réponses possibles et plausibles (des hypothèses) prospectives, répondant aux attentes et créant une valeur.

3.5.2 Les différents espaces

Nous reprenons l'idée apportée par les deux paradigmes de superposition ou conjonction de différents mondes, ou différents espaces, mais nous les structurons à partir de principes temporels introduits précédemment. Nous inscrivons donc la conception architecturale dans la conjonction de trois espaces, correspondant à trois présents en tension (le présent du passé, le présent du présent et le présent du futur).

L'espace de la connaissance (ou de la mémoire) collective contient des éléments de savoir commun et partagé auquel l'architecte peut avoir accès. Nous ne chercherons pas à l'aborder de manière épistémologique et nous ne ferons que l'effleurer d'un point de vue ontologique. Dans sa démarche de conception architecturale, l'architecte vient mobiliser des données, des informations, des croyances, des hypothèses, des connaissances. . . pour sa compréhension de l'opportunité, de la situation, des enjeux, des attentes. Les modalités d'accès à ces données sont multiples : lecture, visionnage ou audition de documents préalablement enregistrés, interrogation de base de connaissances, interrogation/exécution de modèles, échanges avec diverses parties prenantes. . . Nous laisserons volontairement de côté la manière dont cette connaissance est accumulée, validée, représentée et archivée. Notons simplement que ces activités ne relèvent pas du périmètre de la conception architecturale, n'étant pas une démarche scientifique ou de construction de connaissance en soi. Tout au plus l'architecte peut solliciter des travaux contributifs visant à enrichir cet espace dans un domaine ou une problématique précise. Peu ou prou, il s'agit de la réalité intersubjective de D. Claeys (sans que pour autant nous puissions affirmer ou démontrer une équivalence stricte), que nous nommerons l'*infosphère*, à laquelle l'architecte a accès.

À cet espace de la connaissance et de la mémoire, cette infosphère, nous pouvons adjoindre un espace de ressources cognitives soit humaines possédant compétences et savoir-faire mobilisable, soit artificielles possédant des capacités de simulation ou de raisonnement.

Nous ne rentrerons pas dans l'étude ou la formalisation de ces espaces, cela nous éloignerait par trop du cœur de cette thèse, et de plus obligerait à convoquer et employer d'autres disciplines telles les sciences cognitives, les neurosciences, les sciences de l'information, de la connaissance, de la sociologie, de l'éducation. Nous nous contenterons ici d'avoir recours à ces espaces en les considérant comme des réservoirs de ressources mobilisables et utilisables par l'architecte. Ils seront donc considérés comme externes, mais interagissant avec l'univers de la conception architecturale.

L'espace de la perception représente la vision, la traduction dans le temps présent par l'architecte de l'opportunité, de la situation, et ce dans toutes ses dimensions possibles et pertinentes. Contrairement à l'infosphère, évolutive, mais rémanente, cet espace est totalement lié au projet concerné et n'a d'autre validité que le sujet concerné dans ses différentes extensions (temporelle, spatiale, industrielle, organisationnelle, politique. . .). Il est à rapprocher partiellement de la réalité subjective de D. Claeys, ou du monde interprété de J. Gero. Notons, et le terme de subjectif de D. Claeys est fort à propos, qu'il contient des images mentales, ou des représentations de ses images doublement connotées : à la fois au travers du prisme de l'infosphère, et au travers de la perception de l'architecte.

Enfin, l'espace de la *projétation* (ou de l'élaboration de l'architecture) se veut prospectif. Les images mentales de l'architecte y sont projetées. Il va ainsi raisonner en construisant, puis en délibérant sur ces modèles abstraits ou conceptuels. Cet espace est à rapprocher d'une partie de la réalité subjective de D. Claeys ou de la notion d'espace *architecturologique* introduit par P. Boudon [BDPS00]. Nous préciserons plus tard le contenu cet espace.

À ces deux derniers espaces, nous pouvons adjoindre un espace de la représentation. Celui dans lequel sont produites, à partir des éléments des espaces perceptif et projectif, des descriptions ou des représentations à but de partage.

3.5.3 L'architecte : observateur et acteur

Dans le FBS situé de J. Gero le concepteur n'était pas oublié. L'imbrication des mondes en était la résultante. D. Claey's va certainement plus loin. l'architecte n'est pas seulement un acteur de la démarche, mais il en est également un observateur réflexif, non indépendant : il observe cette démarche de conception dans laquelle il est lui-même un élément, pour en apprécier la pertinence, et apporter des correctifs si nécessaire. En empruntant une analogie cybernétique ou automatique ; nous dirions que dans la régulation du système vis-à-vis d'une consigne externe (ici la consigne tiendrait dans l'objectif de converger vers une solution architecturale satisfaisante pour les parties prenantes), l'architecte porterait une partie conséquente de l'observation, du contrôle et de la commande.

Sans s'enfermer dans une posture totalement anthropocentrique de la conception architecturale, de la position particulière de l'architecte que nous avons mise en avant découlent plusieurs conséquences majeures sur la manière de qualifier et donc d'appréhender le processus de conception architecturale.

La première est immédiate : la solution architecturale dépend fortement de l'architecte, la sensibilité de l'architecture à l'architecte ne saurait être ignorée²³. Une solution architecturale est non reproductible. Non seulement cette solution est sensible à l'architecte (deux architectes différents convergeront vers deux solutions a priori dissemblables), mais le même architecte qui affronterait deux fois la même opportunité ne saurait y apporter la même réponse. Les deux conceptions étant de facto séparées temporellement, d'une part l'infosphère (le présent du passé!) aurait évolué, mais également la perception de l'architecte (entre temps il a appris, fait des expériences sensibles. . . , bref il a évolué).

La difficulté à mécaniser ou sérialiser le processus de conception est due à la place prépondérante qu'occupe l'architecte qui empêche la réduction du processus de conception à une forme de mécanisation ou de formalisation algorithmique définitive. Le fait que l'architecte observe, contrôle et modifie la manière d'agir rend fragile une vision mécanique de la conception. Au contraire, des modèles cognitifs pourront certainement mieux rendre compte de la démarche de conception.

3.5.4 Processus et opérations

Gero se contente de répliquer les concepts de son ontologie sur les différents mondes, puis d'enrichir la spécification de ces activités en ne les réduisant plus au *simple* passage d'un concept à l'autre, mais en y incluant également des passages d'un monde à l'autre. Claey's quant à lui, démultiplie habilement le processus de (co)conception sur trois plans : processus de conception en général, processus particulier, modèle cognitif de l'architecte.

Nous ne pouvons prétendre à délivrer une théorie aussi aboutie que celle de D. Claey's. Cette dernière s'inscrit dans un champ, celui de l'architecture dans son sens premier (en bâtiment ou en matière d'urbanisation), bien délimité, et pour lequel il existe un socle épistémologique conséquent, ainsi que quelques millénaires d'existence de la discipline depuis Vitruve, ce qui n'est par rien ! Notre domaine d'intérêt est par nature plus vaste, plus flou et encore peu fondé ; nous en sommes toujours à commenter l'apport et les

23. Ceci devrait interpeller les organisations et entreprises affrontant la conception de systèmes artificiels complexes, sur le rôle, la position, l'autonomie et la reconnaissance qu'ils donnent à leur population d'architectes, la qualité et la pertinence des solutions architecturales en dépendant directement.

fondements posés par Simon en 1969, dans son ouvrage phare, *The science of the artificial*[Sim69]. Notre proposition en matière de modélisation du processus de conception architecturale sera par construction incomplète. Nous l'assumons et le justifions de la manière suivante :

- l'absence d'études épistémologiques, sociologiques, comportementales sur le processus de conception architecturale des systèmes artificiels complexes ;
- l'insuffisance ou la difficulté d'accès à des catalogues d'architecture ou de retours d'expériences ;
- la variété des domaines d'application du champ considéré.

En revanche, cette incomplétude sera localisée et explicitement structurée dans l'étagement de la modélisation. Nous retiendrons les points suivants.

- Un niveau du processus de conception en général : il s'inspirera fortement de la modélisation faite par D. Claeys.
- Nous lui adjoindrons un niveau préliminaire, capturant ce qui nous apparaît être les principes structurants d'une conception architecturale. Ce niveau sera dit niveau archétypal.
- Un niveau du processus de conception particulier : nous pensons que ce processus (et cela sera notre hypothèse de travail pour la suite) est (co)construit par l'architecte immergé dans son environnement de travail (constitué entre autres de parties prenantes dites *internes* – son entreprise d'appartenance, sa hiérarchie... – et de parties prenantes dites *externes* – le client, le sponsor, les utilisateurs... –). Nous nous restreindrons à le peupler de quelques opérations, mais sans agencement particulier. En revanche nous ferons une première proposition pour permettre à l'architecte de retranscrire cet agencement.
- Un niveau 'cognitif' de l'architecte : là encore, nous ne chercherons pas à bâtir un modèle cognitif validé et définitif de l'architecte, mais nous suggérerons un certain nombre d'opérations cognitives formant ce que nous pourrions nommer la *boîte à outils* de l'architecte.

Dans le paradigme de J. Gero, nous pouvons déceler deux types d'activités : les activités *de passage*, celles qui passent et transforment un concept en un autre, et les activités dites de reformulation. Cela présuppose une forme de parcours causal ou du moins logique entre les différents concepts (la numérotation même des activités semble suggérer une sorte d'ordre logique). Claeys, lui, grâce à la notion d'opérandes, met en avant des opérations qui établissent ou déterminent tel ou tel opérande (ou partie d'opérande), puis des opérations de changement. Notre approche sera voisine de celle de D. Claeys, c.-à-d. nous *accrocherons* les opérations aux opérandes, mais cependant sans distinguer entre opération et changement. Nous aurons donc une vision englobante avec l'idée qu'une opération recouvrira aussi bien les aspects d'identification, de spécification que de modification. Bref, dans notre paradigme, la notion d'opération subsumera :

- l'identification initiale ;
- la définition et la spécification ;
- les différentes modification ou remise à jour, à savoir (cf. section 3.3.1 page 97) : la reformulation, l'évolution ou la transformation.

Ceci afin de conserver un caractère économe à notre paradigme. Peut-être plus tard, conviendra-t-il de raffiner ces opérations et d'y distinguer des nuances. Nous n'en voyons pas d'utilité immédiate pour le moment.

3.6 Synthèse

Notre démarche de recherche visant à proposer un paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes s'est articulée autour de trois théories que nous avons mises en exergue, et qui nous ont servi pour aboutir à notre proposition par bissociation. Il s'agit donc d'une sélection volontaire et assumée, que nous pouvons expliquer de la manière suivante :

- FCF d'E. Crawley Il est le fruit et la synthèse des travaux de recherche au MIT dans le domaine de la conception système. Basé sur la partition fonction/forme, ou intentionnel/structurel, il introduit le concept comme fonction de passage. Il est mis en avant dans un des plus récents traités sur l'architecture des systèmes complexes ([CCS15]). Nous avons été séduit par son caractère économe et opérant.
- FBS de J. Gero Il y a de nombreuses théories (ou propositions de théories) sur le processus de *design* produit et artefact, héritières des concepts, et en particulier de la *rationalité limitée* introduite par Simons ([Sim69]). Nous avons retenu celle de J. Gero, car elle offrait une ontologie assez aboutie, des opérations et une évolution dite *située* (posture constructiviste), ainsi que de nombreux retours d'expériences et de nombreuses critiques. Ce qui rendait cette matière représentative des théories de la conception visant un artefact ou un produit *concret*. Elle ne pouvait à elle seule représenter une base qui aurait pu être étendue à la conception de systèmes complexes, et non de *simple* artefact, mais elle ne pouvait être ignorée. S'en servir comme base pour la bissociation avec le FCF d'E. Crawley, puis ensuite avec le paradigme de D. Claeys, s'est révélé fructueux.
- Paradigme de D. Claeys La thèse de D. Claeys ([Cla13a]) est remarquable à plus d'un titre. Elle fait la synthèse et part d'un état de l'art en matière de conception architecturale (en bâtiment, et un urbanisation). En particulier, elle incorpore les avancées de P. Boudon qui introduit le concept d'architecturologie ([BDPS00, Bou03]). Elle met l'architecte au centre du jeu, à la fois comme observateur et à la fois comme acteur du processus qui capture, incorpore ou crée la connaissance nécessaire pour viser l'architecture. La démarche de D. Claeys est une démarche (analytico) systémique pour bâtir le paradigme proposé. Cela aboutit à un modèle très complet, et architecturé, fondé sur des principes explicites (trialogie, dialogie, interactions entre concepteur et parties prenantes, posture constructiviste).

Une théorie relativement récente, la théorie C-K ([LMHW14, HW02]), aurait sans doute mérité de venir en complément ou en remplacement du FBS de J. Gero. Si elle va au-delà du FBS de J. Gero, sa portée est moins ciblée architecture que celle de D. Claeys, car plutôt cantonnée à la conception d'artefacts ou produits. Néanmoins certains concepts mis en avant dans notre proposition ne sont pas étrangers à la théorie C-K.

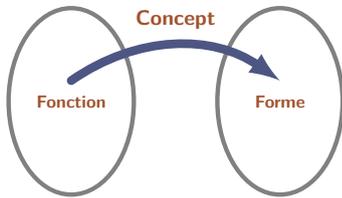
- Le concept d'expansion, notion centrale dans la théorie C-K, sera repris, sans néanmoins en faire la clé de voûte. Cette notion sera présente dans certains opérateurs, et surtout dans la forme archétypale de la conception que nous proposerons. La succession de divergence/convergence est à rapprocher des expansions/restrictions de la théorie C-K.
- Même s'il n'y a pas d'équivalence entre les espaces C et K et les deux espaces fondamentaux (l'espace perceptif et l'espace d'élaboration de l'architecture), nous reprenons l'idée d'une dichotomie et d'un jeu qui se joue à la fois sur chacun des espaces et par passage d'un espace à l'autre. Notre espace d'élaboration de l'architecture pourrait grossièrement s'apparenter à l'espace C, si ce n'est que nous

tenterons de le structurer en divers modèles et dimensions, et de les spécifier. En revanche, pour ce qui est de l'espace des connaissances K, nous avons préféré le scinder en deux : un espace de la connaissance commune extérieur au concepteur et un espace propre à l'architecte, l'espace perceptif, donc entaché des biais perceptifs, récupérant en cela la théorie du réel augmenté de D. Claeys. Cela nous semble plus clair, même si dans la théorie C-K, l'espace K, comme l'espace C, semble être teinté du concepteur, et entaché de ses émotions, de son histoire, de sa sociologie. . . « [...] C et K sont nécessairement associés à un concepteur particulier. » [HW02]

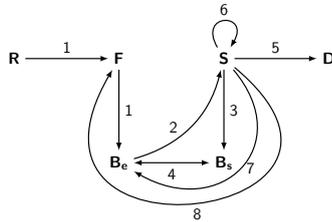
- Parmi les objectifs visés de la théorie C-K, se trouve celui de pouvoir décrire, et donc partager, une histoire de chaque conception comme une succession d'opérations particulières. Cette capacité de pouvoir verbaliser la démarche de conception, qui par certains côtés pourrait apparaître comme *magique*, et de l'incarner dans une narration explicative et partageable, est un objectif que nous cherchons également à relever.
- En revanche, un des aspects de la théorie C-K que nous n'avons pas retenu est la dichotomie entre espace des concepts et des connaissances comme étant respectivement l'espace des propositions sans statut logique de celles qui ont un statut. C'est sans doute le facteur qui nous éloigne le plus de ladite théorie. Dans notre cas, il nous semble aussi difficile de donner un statut aux propositions de l'espace d'élaboration de l'architecture qu'à celles de l'espace perceptif, plutôt peuplé de croyances, de pensées, d'idées, de convictions. . . Même si les opérations que nous introduirons chercheront à améliorer le statut des propositions, nous ne visons pas au travers de la conception architecturale la construction de connaissances au statut logique *bien défini*. L'architecture visant à proposer des futurs possibles et plausibles, nous viserons *simplement* une vérification et une validation²⁴ tant que faire se peut des propositions.

24. Validation et vérification pris ici dans leurs sens en ingénierie et non ceux de la logique. En paraphrasant Barry Boehm [Boe84], "Am I building the right architecture? Am I building it right?".

Le FCF d'E. Crawley



le FBS de J. Gero



R=exigence,
F=fonction,
Be=comportement
attendu,
Bs=compt. dérivé de
la structure,
S=structure,
D=description

1=formulation, 2=
synthèse, 3=analyse,
4=évaluation,
5=documentation,
6=reformulation
structurelle,
7=reformulation
comportementale,
8=reformulation
fonctionnelle

1^{ère} Bissociation

FCF ⊕ FBS

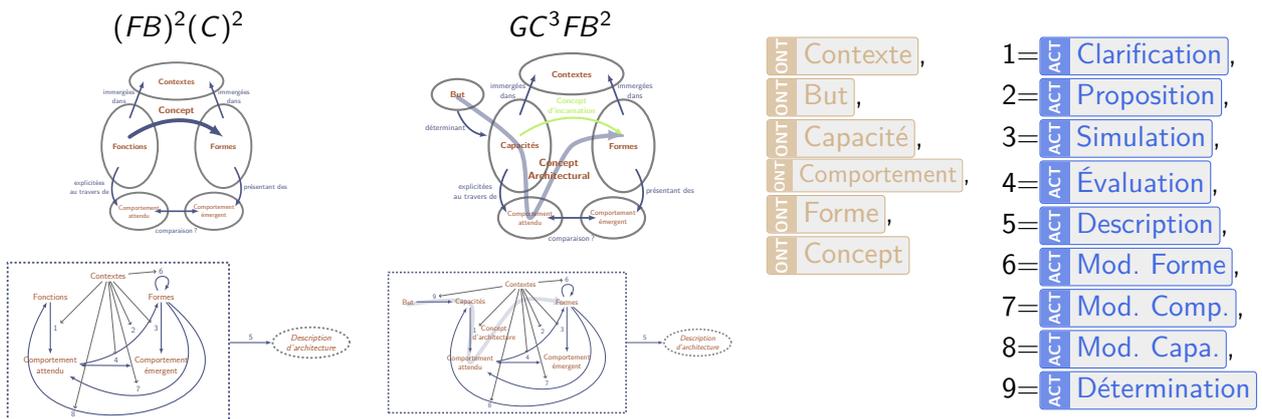
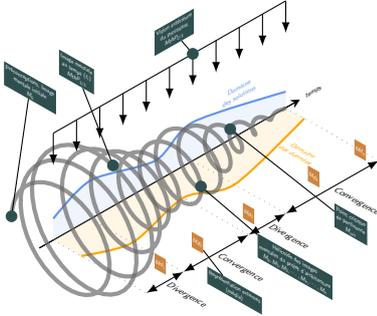


Figure 3.20: Synthèse de la première bisociation

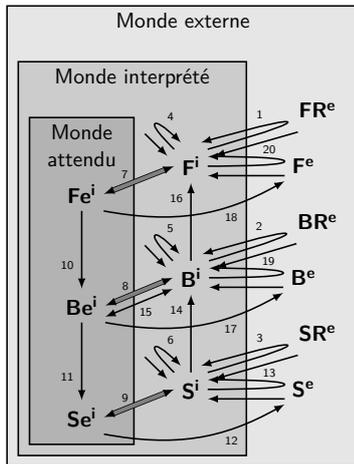
le paradigme (analytico) systémique de D. Claeys



- R^+ le réel augmenté,
- M_i le modèle architectural,
- O_i des opérations architecturales de (co)conception,
- O_i des opérations cognitives.

- $MthP_{1/3}$, un modèle systémique général de (co)conception *visant* l'architecture,
- $MthP_{2/3}$, un modèle systémique du (co)concepteur (auto)réflexif,
- $MthP_{3/3}$, un modèle systémique (en) particulier de (co)conception *visant* l'architecture.

le FBS situé



- ↔ Comparaison
- ⇐ Sélection
- Action
- ⇄ Push/pull

Même *ontologie* que le FBS initial, et 3 mondes imbriqués :

- monde externe,
- monde interprété et,
- monde attendu.

- la sélection comme opérateur de passage entre monde interprété et monde attendu,
- le concept de push-pull comme mécanisme de base pour l'interprétation (monde externe ↔ monde interprété) et la construction et l'entretien de la mémoire.

2^{ème} Bissociation

$GC^3FB^2 \oplus$ Paradigme (analytico) systémique de D. Claeys

Quatre niveaux de processus seront à considérer :

- un niveau archétypal,
- un niveau général ,
- un niveau de conception particulier,
- un niveau *cognitif* de l'architecte, sa *boîte à outils*.

Des **ESP** **Espace**s bâtis autour des idées suivantes :

- l'incorporation du temps (vision augustinienne),
- l'architecte comme acteur et observateur (mondes *internes* et *externes*).

Les **ONT** **Concepts** précédents sont repris, pour donner lieu à des **MOD** **Modèle**s de la conception répartis sur les différents **ESP** **Espace**s. Les **ACT** **Activité**s vont inspirer les **PRO** **Processus**s faisant évoluer les **MOD** **Modèle**s.

Figure 3.21: Synthèse de la deuxième bissociation

Chapitre 4

Définir une démarche de la conception architecturale

« La conscience n'est jamais assurée de surmonter l'ambiguïté et l'incertitude. »

Edgar Morin, *Le paradigme perdu*

Le paradigme auquel nous avons abouti par différentes bissociations est d'abord renforcé pour servir de fondement à la démarche. Il est formalisé en se basant sur quelques concepts : des espaces, peuplés d'artéfacts s'agréant en des modèles définis à partir de l'ontologie élaborée. Ces modèles évoluent grâce à des processus élémentaires, émanant des activités identifiées au chapitre précédent. Une démarche de la conception architecturale reposant sur ces fondements, visant à doter l'architecte de systèmes artificiels complexes d'un cadre opérant, voire performatif, est alors proposée. Elle s'articule sur quatre niveaux, s'inspirant en cela de l'approche de D. Claeys.

Un niveau dit archétypal condense les grands principes de toute démarche de conception architecturale de systèmes artificiels complexes. Ces principes sont issus du travail de synthèse que nous avons effectué sur la conception (cf. section 1.3.3 page 42). Un niveau dit général repose sur le principe d'une partition présent-futur, se différenciant en cela des approches d'ingénierie qui s'appuient traditionnellement sur une dichotomie problème-solution. L'idée prépondérante tient dans l'assentiment que lorsqu'un architecte conçoit, il ne résout pas de problèmes, mais il imagine des futurs possibles et plausibles, nécessitant qu'il perçoive le présent. Un niveau dit particulier a pour objectif de permettre la narration d'une conception particulière. Nous proposons pour cela une notation de la conception. Elle s'appuie sur un certain nombre de mécanismes élémentaires, dont celui de l'enchaînement divergence-convergence, que nous nommons mécanisme de respiration de la conception architecturale. Un niveau dit de boîte à outils n'est pas traité dans le cadre de cette thèse. Il comprendrait les différentes opérations cognitives nécessaires à l'architecte pour accomplir sa tâche de conception (abstraction, questionnement, jugement, décision, etc.).

Sommaire

4.1	Fondements	128
4.2	Démarche de conception architecturale	146
4.3	Synthèse	172

4.1 Fondements

4.1.1 Nature et fonction des éléments

Le paradigme de la conception architecturale que nous proposons s'articule autour de quelques notions principales dont nous faisons ici le tour avant de revenir plus en détail sur chacune d'entre elles.

ESP Espace

Le paradigme est construit à partir de la reconnaissance de divers espaces. Ils permettent d'opérer des partitions de l'univers de la conception architecturale. Ces différents espaces sont un moyen d'affronter la complexité et la difficulté de la conception architecturale en la répartissant et l'ordonnant sur eux. Ces différents espaces et leur organisation forment une vision *système* de l'univers de la conception architecturale. Plus que de répondre à des questions ontologiques ou épistémologiques, ils fournissent un cadre pour définir le plus clairement possible la conception architecturale au travers d'opérandes et d'opérations ou processus en les répartissant entre ces différents plans ou espaces. Ceci afin de viser le caractère opérant, voire performatif du paradigme.

Objets

Chacun de ces espaces est peuplé d'objets. Parmi les différents espaces, nous nous intéresserons plus précisément à ceux qui servent directement de support à l'architecte dans sa démarche de conception architecturale et qui lui sont propres. Ces espaces seront alors peuplés d'objets imaginés, conceptualisés par l'architecte lui-même : ses images mentales (des idées, des pensées, des opinions, des valeurs, des croyances, des schémas, des théories, des concepts. . .) ainsi que de supports produits. Nous donnerons à ces derniers le nom d'artéfacts de la conception architecturale, ou en abrégé artéfacts. La nature et le support de ces artefacts peuvent être très divers. Donnons ici quelques exemples pour illustrer le concept. Un artéfact produit par l'architecte peut être :

- une note, un commentaire, une idée griffonnée ;
- une référence à un élément externe (une interview, un article, un document. . .) ;
- une esquisse, un schéma, un dessin. . . ;
- une analyse, une synthèse, une évaluation, un argumentaire, une décision. . . ;
- et toute production effectuée par l'architecte dans le cadre de son travail de conception architecturale.

MOD Modèle

Ces différents artéfacts d'un même espace produits par l'architecte peuvent s'agréger en des tous cohérents, qui deviennent des modèles partiels, chacun portant sur un aspect donné de la réalité. L'architecte travaillant à la fois sur la perception du temps présent, et sur des projections de l'avenir, ces modèles seront tantôt des modèles tentant de refléter la réalité actuelle, tantôt des modèles portant sur des futurs envisagés.

PRO Processus

Partant de l'assentiment que la conception architecturale relève d'une forme de processus (cf. en particulier [Bou04]), elle comporte donc un certain nombre de processus élémentaires que tout architecte met en œuvre (consciemment ou inconsciemment, implicitement ou explicitement). Nous chercherons à faire émerger et à définir un ensemble de processus élémentaires de la conception architecturale portant sur les différents modèles définis.

Quels types de processus élémentaires envisageons-nous pour bâtir notre paradigme ? Nous ferons le choix de façonner les processus élémentaires comme étant des processus qui font évoluer un modèle en particulier. Il ne s'agit pas de rejeter d'emblée des processus qui porteraient sur plusieurs modèles, car ils pourront être traités en considérant un modèle composite, composé des modèles désignés. Nous nous proposons par la suite d'établir un premier lexique de processus élémentaires portant sur un modèle en particulier. Les différents modèles que nous allons définir vont devenir les entrées et les sorties de ces processus. Il y aura donc autant de processus élémentaires que de modèles.

En synthèse, nous pouvons énoncer le principe basique suivant de notre paradigme :



Point important 4.1

[Les notions principales de la conception architecturale]

L'univers de la conception architecturale est peuplé de nombreux *objets*, dont certains sont produits par le travail de l'architecte, les *artefacts*. Différents **ESP** Espace s permettent de répartir ces objets (artefacts compris) suivant différents plans. Les artefacts s'agrègent en différents **MOD** Modèles suivant leur nature. Ces **MOD** Modèles évoluent grâce à des **PRO** Processus, un **PRO** Processus faisant évoluer un **MOD** Modèle en particulier.



Définition 4.1

[Processus élémentaire de la conception]

Soit (E_j) les espaces de la conception architecturale, (Mod_{ij}) , les différents modèles, où Mod_{ij} désigne le modèle j de l'espace E_j . Nous définirons un processus élémentaire de la conception architecturale comme étant :

- la donnée d'un modèle Mod_{km} évoluant grâce au processus, qui sera donc l'entrée et la sortie du processus considéré,
- la spécification de l'évolution du modèle considéré au travers du processus.

4.1.2 Espaces

Partant d'une vision constructiviste, et sans entrer dans les débats philosophiques et épistémologiques de la dernière moitié du vingtième siècle¹, sur la notion de réel et de réalité, nous inscrivons l'univers de la conception architecturale comme un univers abstrait, celui d'une construction mentale, complémentaire et différente du réel. En revanche, l'univers du réel est celui dans lequel l'architecte peut faire des expériences sensibles, et dans lequel prendra place, plus tard, le projet visé par la conception architecturale, si celui-ci aboutit.

Nous rappelons ici les sources qui ont permis de fonder et d'aboutir à la définition de l'univers de la conception architecturale et sa déclinaison en différents espaces :

- l'empilement des mondes du FBS situé de J. Gero [GK06] ;
- la notion de réalité augmentée et les différents espaces de D. Claeys [Cla13a] ;

1. Nous pensons entre autres, et sans ordre précis, aux apports de Herbert Simon, Ludvig Von Bertalanffy, Jean-Louis Le Moigne, Edgar Morin, Karl Popper, Thomas Kuhn, Joël de Rosnay, Pierre Teilhard de Chardin...

- la bissociation des deux (cf. section 3.5 page 117) ;
- les trois formes du temps chez Saint Augustin [Aug93] (cf. section 3.5.1 page 118).

Issus de la deuxième bissociation (cf. section 3.5.2 page 119), les six espaces suivants sont identifiés :

ESP	Infosphère	Un espace réservoir contenant la connaissance et la mémoire collective partagées, auxquelles l'architecte a accès.
ESP	Ressources	Un espace réservoir contenant les ressources cognitives (tant humaines qu'artificielles) mobilisables auxquelles l'architecte a accès.
ESP	Réel	L'espace des expériences sensibles et celui dans lequel s'inscrira, peut-être, plus tard la réalisation planifiée par le projet architectural.
ESP	Perçu	L'espace propre à l'architecte et propre à l'opportunité considérée, qui est la traduction de la perception de l'architecte. Il contient les images mentales et les représentations que se fait et se construit l'architecte confronté au réel en s'appuyant sur l'infosphère et les ressources.
ESP	Envisagé	L'espace propre à l'architecte et à l'opportunité considérée, qui lui permet de penser les futurs possibles et plausibles, bref d'élaborer une solution architecturale. Il le fait à travers le prisme de sa perception, bref de manière située. Comme l'espace de la perception, il contient à la fois des images mentales et des artefacts.
ESP	Intermédiaire	L'espace propre à l'opportunité considérée servant de lieu de passage entre les mondes interne et externe de l'architecte. C'est un espace peuplé d'artefacts de représentations qui seront partagées entre l'architecte et les différentes parties prenantes impliquées. Cela comprendra entre autres des représentations de la vision de l'architecture élaborée par l'architecte à des fins de partage, mais également tout type d'artefacts nécessaires à partager entre l'architecte et les parties prenantes impliquées. Ces différents artefacts ne sont pas forcément produits par l'architecte (il produit avant tout les artefacts de son monde interne), mais peuvent l'être par les autres parties prenantes impliquées.

TABLE 4.1: Peuplement des espaces

ESP	Infosphère	tout type d'objet permettant de contribuer à l'accroissement de la connaissance de l'architecte
ESP	Ressources	tout type d'objet permettant de contribuer à l'accroissement de la connaissance de l'architecte
ESP	Réel	tout objet du monde sensible
ESP	Perçu	images mentales, artefacts (de la conception architecturale)
ESP	Envisagé	images mentales, artefacts (de la conception architecturale)
ESP	Intermédiaire	artefacts (entre autres de représentation) permettant l'échange entre l'architecte et les parties prenantes impliquées

La manière dont les différents espaces vont s'organiser et s'agencer les uns les autres repose sur quelques principes fondateurs :

- une triologie du temps, directement basée de la conception augustinienne du temps : *memoria* / *contuitus* / *expectatio* ;
- une triologie entre monde externe de l'architecte (son environnement, ce à quoi il a accès), son monde interne et le monde intermédiaire permettant de relier les deux.

Ces six espaces s'agencent de la manière suivante suivant les principes précédemment introduits.

TABLE 4.2: Répartition des espaces suivant la triologie des temps

Memoria	ESP Infosphère	
Contuitus	ESP Réel, ESP Perçu, ESP Ressources	ESP Intermédiaire
Expectatio	ESP Envisagé	

TABLE 4.3: Répartition des espaces suivant la perspective de l'architecte

Monde externe	ESP Réel, ESP Infosphère, ESP Ressources	Monde intermédiaire
Monde interne	ESP Perçu, ESP Envisagé	ESP Intermédiaire

Montrons brièvement comment ces espaces s'articulent entre eux en exhibant quelques passages d'un espace sur l'autre et leur interdépendance.

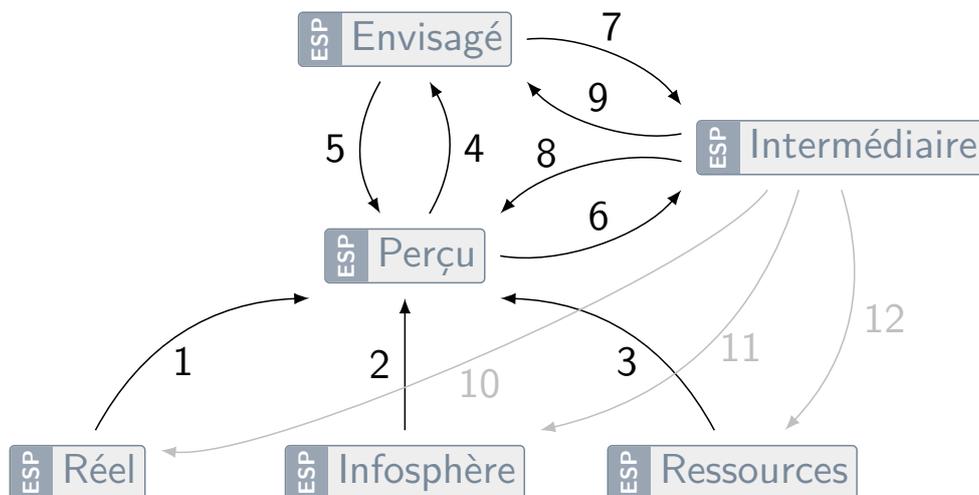
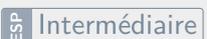
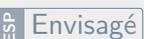


Figure 4.1: Structuration des six espaces

TABLE 4.4: Passage d'un espace sur l'autre

1 :  → 	L'architecte fait des expériences sensibles et s'immerge dans le réel pour percevoir le ou les contextes dans lesquels devra s'insérer son projet architectural.
2 :  → 	L'architecte interroge l'infosphère pour augmenter sa perception du monde réel et de l'opportunité considérée.
3 :  → 	L'architecte active et utilise des ressources pour augmenter sa perception du monde réel et de l'opportunité considérée.
4 :  → 	L'architecte se sert de sa perception, et des éléments saillants qu'il a perçus pour élaborer des futurs possibles et plausibles.
5 :  → 	L'architecte confronte les idées qu'il a élaborées par rapport à la perception qu'il a de l'opportunité.
6 :  → 	À partir des perceptions de l'architecte, une description de cette perception est produite.
7 :  → 	À partir des propositions d'architecture de l'architecte, une description de cette élaboration est produite.
8 :  → 	L'architecte améliore sa perception du contexte présent en s'appuyant sur les artefacts partagés avec les différentes parties prenantes impliquées.
9 :  → 	L'architecte perfectionne son élaboration des futurs en s'appuyant sur les artefacts partagés avec les différentes parties prenantes impliquées.
10 :  → 	Les descriptions produites sont publiées et partagées avec le monde réel.
11 :  → 	Les descriptions produites viennent enrichir l'infosphère.
12 :  → 	Les descriptions produites peuvent servir de référence à la mobilisation de ressources (par exemple, comme spécification d'une simulation).

4.1.3 Modèles

Différents artefacts d'un même espace s'agrègent en un tout cohérent, formant un modèle d'un des espaces de la conception. Pour cela nous allons typer les différents artefacts, et agréger les artefacts en modèle suivants leur(s) type(s).

Modèles issus de la première bissociation

Nous allons reprendre le paradigme augmenté issu de la première bissociation, à savoir le GC^3FB^2 . Chacun des concepts de base, éléments de l'ontologie proposée, va être utilisé pour définir autant de types correspondants.

TABLE 4.5: Type des artefacts et modèles

Concept du GC^3FB^2	définit le type (d'artefact)	artéfacts du type agrégé en le
		MOD Modèle
ONT But	<i>t_but</i>	MOD But
ONT Contexte	<i>t_contexte</i>	MOD Contexte
ONT Capacité	<i>t_capacité</i>	MOD Capacité
ONT Comportement attendu	<i>t_attendu</i>	MOD Comptement attendu
ONT Forme	<i>t_forme</i>	MOD Forme
ONT Comportement émergent	<i>t_émergent</i>	MOD Comportement émergent
ONT Concept	<i>t_concept</i>	MOD Concept
ONT Description	<i>t_média</i>	MOD Média

Donnons ici une définition informelle de ces différents modèles introduits.

MOD But

Le modèle du **MOD** But produit par l'architecte comprend les artefacts qui sont du type *t_but*, c.-à-d. ceux qui éclairent sur le but à atteindre. La finalité ou le but visé est un élément externe au travail d'architecture, c.-à-d. il ne lui appartient pas et n'est pas déterminé par l'architecte lui-même, mais il est l'expression de parties prenantes externes (le client, le sponsor, l'autorité détentrice...). Ce caractère externe marque le fait que l'architecte est au service de ce but, et non qu'il en est le détenteur. Si ce but appartient au monde externe, l'architecte s'en construit une perception et une compréhension. Le modèle du **MOD** But capture cela. Il est par construction a minima doublement biaisé : une première fois dans son expression (écrite ou orale) par les parties prenantes détentrices, et une deuxième par l'interprétation qu'en fait l'architecte. Ici, le but tel que perçu traduit cela.

MOD Contexte

Le modèle du **MOD** Contexte rassemble les différents artefacts afférents au contexte (du type *t_contexte*). Il traduit la vision, la compréhension que se fait l'architecte du contexte dans lequel va s'insérer le projet pour lequel il est sollicité.

MOD Capacité

Le modèle des **MOD** Capacité agrège les différents artefacts de type *t_capacité*. Les capacités (et non les fonctions!) sont la manière de traduire et de spécifier les attendus de l'architecture visée. Au-delà d'une approche fonctionnelle qui se restreindrait à fournir une réponse à « *Qu'est que cela fait ?* », l'architecte vise ici des réponses à « *Que pourrions-nous obtenir comme résultat ? Quels effets, quels (nouveaux) usages pourrions-nous en tirer ?* ». La capacité représente l'aptitude à pouvoir délivrer un résultat, un effet observable ou sensible. L'établissement du modèle des **MOD** Capacité de l'architecture permet de spécifier ce que permettra d'obtenir la solution architecturale visée en termes de résultat observable ou d'expériences sensibles.

MOD Comp. attendu

Le modèle **MOD** Comp. attendu, collectant les artefacts de type *t_attendu* est le complément naturel du modèle des **MOD** Capacité. Si une capacité spécifie une aptitude à produire un effet ou un résultat, le comportement attendu capture une ou des façons d'explicitier cet effet ou ce résultat, en répondant à la question « *À quel comportement perceptible pouvons-nous nous attendre si telle ou telle capacité s'accomplissait ?* ».

MOD **Forme**

Le modèle de la **MOD** **Forme** assemble et unit tous les artefacts de type *t_forme* pour produire une proposition de solution architecturale. Nous reprenons ici le concept de forme évoqué et développé dans le chapitre précédent, à savoir des éléments organisés à l'aide d'une structure, sans donner de sémantique plus précise ni à élément (si ce n'est que tout élément concourt à la solution architecturale) ni à structure (autre que représentant les liens entre les différents éléments, ainsi que la dynamique des liens et des éléments : la structure évolue).

MOD **Comp. émergent**

Le modèle du **MOD** **Comp. émergent** réunit les différents artefacts de type *t_émergent*. Il permet d'entrevoir ce que serait le comportement qui émergerait de la forme (ou d'une forme). Il est la traduction comportementale du modèle de la **MOD** **Forme** qui, lui, est majoritairement centré sur les aspects structurels ou organisationnels.

MOD **Concept**

Le modèle du **MOD** **Concept** rassemble et combine les différents artefacts de type *t_concept*. La finalité de ce modèle est de pouvoir poser la fonction de transfert, ou les principes régissant le passage entre capacités visées et forme proposée, et plus généralement entre tous les modèles bâtis par l'architecte. Il en est la clé de voûte assurant la cohérence d'ensemble, et par la même son intelligibilité. Ce genre de modèle comprendra des artefacts reflétant les différentes idées, styles ou solutions types (*pattern*) imaginés par l'architecte, ses choix, et en particulier le choix des points jugés dimensionnants ou clés, les qualités principales qu'il veut donner à l'architecture, les options ou alternatives envisagées et les choix (argumentés ou non) qui en découlent. Bref ce qui permettra de converger vers une solution architecturale et de la rendre intelligible, compréhensible.

MOD **Média**

Il s'agit de l'ensemble des descriptions ou représentations produites (pas forcément directement par l'architecte) à partir des modèles précités à des fins de partage. C'est le modèle visuel (ou représentatif) de l'architecture, qui regroupe différents artefacts (différentes vues, différents points de vue. . .).

Autres Modèles

À l'exception du modèle **MOD** **Média**, les modèles définis ci-avant concernent le monde interne de la conception architecturale, ils agrègent les artefacts propres à l'architecte dans sa tâche de conception.

D'autres modèles viendront compléter cette première liste de modèles. Nous les introduirons plus tard, par le biais de l'identification des processus qui s'y rapportent, à savoir les processus connexes à la conception. En effet, la conception architecturale ne saurait être pensée comme une activité autonome, isolée et indépendante du reste.

4.1.4 Modèles et espaces

Les différents modèles de la conception architecturale, peuplés des artefacts typés de l'architecte, se répartissent sur les différents espaces de la manière indiquée dans le tableau ci-après.

TABLE 4.6: Répartition des modèles sur les espaces

Espace	(abrite les) Modèles
ESP Perçu	MOD But MOD Contexte
ESP Envisagé	MOD Capacité MOD Comptement attendu MOD Forme MOD Comportement émergent MOD Concept

Pour des facilités d'expression, nous introduisons des modèles (par abus de langage) qui sont la liste composée de l'énumération d'un certain nombre de modèles.

MOD (du) Perçu Le modèle du perçu regroupe les différents modèles de l'ESP Perçu. Il s'agit des modèles que se construit l'architecte, issus de sa perception et compréhension de l'opportunité à traiter, à la fois dans ses finalités, enjeux, attentes, et dans ses différentes dimensions contextuelles.

MOD (de l')Envisagé Le modèle de l'envisagé regroupe les différents modèles de l'ESP Envisagé. Il s'agit des modèles qu'élabore l'architecte pour viser une solution architecturale.

TABLE 4.7: Synthèse des modèles de la conception architecturale

le MOD Modèle (par abus de langage)	... est la liste composée de l'énumération des MOD Modèles suivants...
MOD (du) Perçu	MOD But, MOD Contexte.
MOD (de l')Envisagé	MOD Capacité, MOD Comp. attendu, MOD Forme, MOD Comp. émergent, MOD Concept.

Ces modèles seront dits modèles de la conception architecturale (p.ex. MOD Forme est un modèle de la conception architecturale; MOD Capacité et MOD Concept sont des modèles de la conception architecturale). Les modèles de la conception architecturale dénoteront l'ensemble des sept modèles de la conception architecturale.

La carte conceptuelle (cf. figure 4.2 page suivante) permet de synthétiser les différentes notions introduites jusqu'alors et de les replacer dans le contexte de la conception architecturale. L'architecte perçoit l'opportunité au travers d'expériences sensibles dans le ESP Réel ou en allant puiser dans les ESP Ressources ou interroger l'ESP Infosphère. Il élabore ainsi des images mentales issues de sa perception ou de son raisonnement lorsqu'il imagine des futurs possibles et plausibles. Il s'appuie pour cela sur des artefacts, expression de son travail, qui se structurent en différents modèles de la conception architecturale. Ces modèles se

répartissent entre modèle ^{MOD}(du) Perçu et modèle ^{MOD}(de l')Envisagé. Ces modèles alimentent à la fois son raisonnement et permettront ultérieurement de produire des artefacts de représentation structurés en modèles partageables, à savoir des ^{MOD}Média. Ces ^{MOD}Média partageables et partagés avec différentes parties prenantes leur servent de support pour la compréhension, voire la validation du travail de conception architecturale.

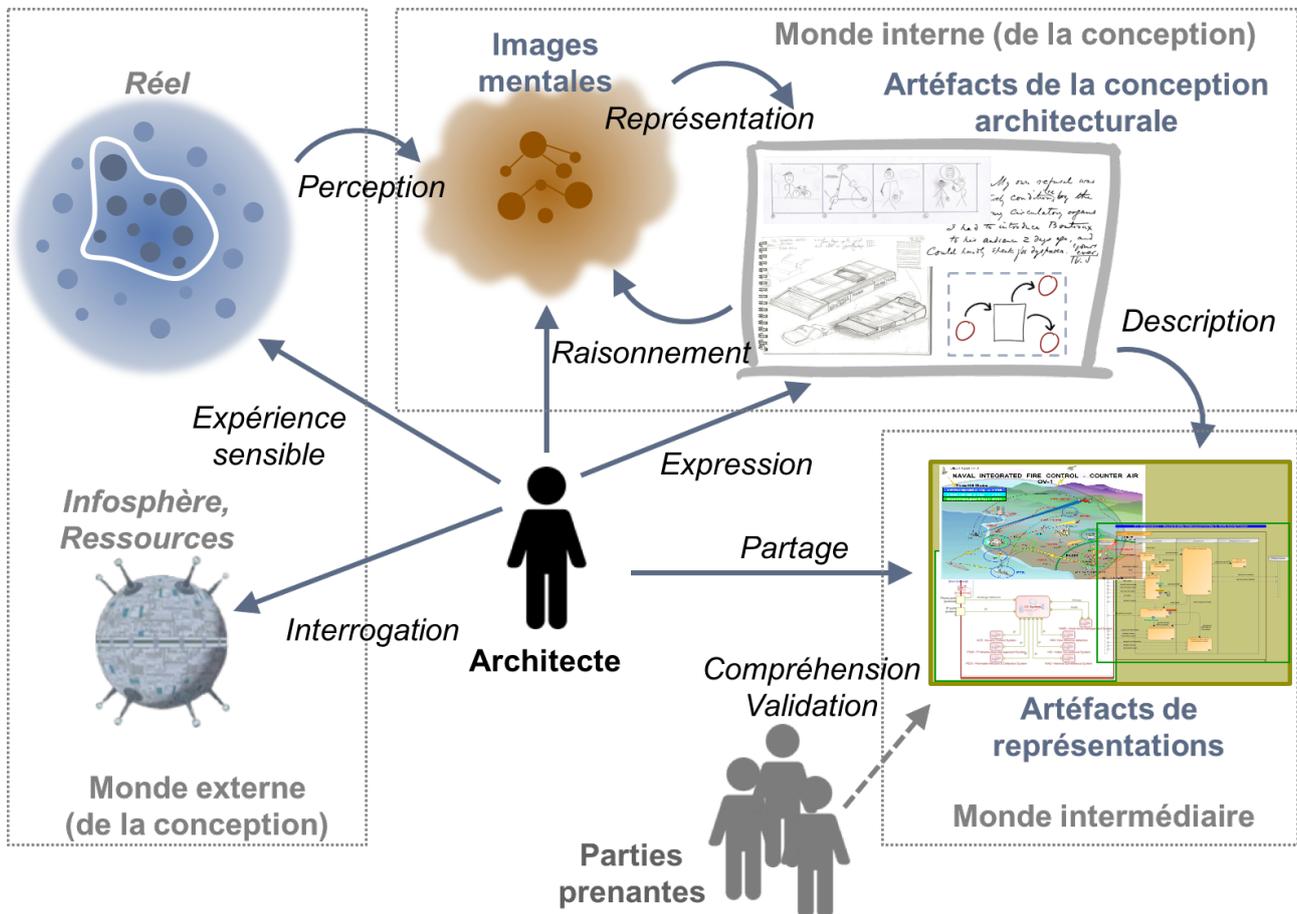


Figure 4.2: Les différents modèles considérés

À titre de rappel et d'illustration, voici quelques natures ou modalités possibles des objets que nous avons particularisés.

- Les *images mentales* peuvent être des idées, des pensées, des opinions, des valeurs, des croyances, des schémas, des théories, des concepts. . .
- Les *artefacts* du travail de conception architecturale se concrétisent par des esquisses, des notes, des croquis, des dessins, du texte, des story-board, des équations, des courbes, des tableaux. . .
- Les *artefacts* de représentation s'incarnent dans des vues (standardisées ou non) exportables de l'architecture. Les modalités de représentation de ces vues peuvent être très diverses : des diagrammes, des dessins, du texte, des graphiques, des illustrations, des schémas, des tableaux, des vidéos, des animations. . .

Dans la suite, en proposant une conceptualisation, très probablement partielle, des modèles du perçu et de l'envisagé, nous ne chercherons pas à établir formellement un modèle mental de l'architecte, mais à lui proposer des supports pour l'aider dans son élaboration d'images mentales qui soient pertinentes dans une démarche de conception architecturale de systèmes artificiels complexes.

En complément des trois modèles principaux, nous pouvons également mentionner d'autres modèles, ici plus spécifiquement, les contenus des espaces *réservoirs*.

- Ressources informatives : ce que contient l' **ESP** **Infosphère**.
- Ressources cognitives : ce que contient l'espace des **ESP** **Ressources**.

Dans la suite nous nous concentrerons plus particulièrement sur les deux premiers modèles, le modèle **MOD** **(du) Perçu** (que nous noterons *MP* en notation abrégée) et le modèle **MOD** **(de l')Envisagé** (que nous noterons *ME* en notation abrégée). M_i , avec $i \in [1..7]$, désignera en notation abrégée un quelconque des sept modèles de la conception architecturale.



Point important 4.2

[Dichotomie perception-élaboration]

Remarquons que là où la plupart des théories sur le processus de conception (*design process*) aboutissait à une interaction entre fonction et structure (ou forme), soit entre intentionnel et structurel, et donc à faire co-évoluer des couples (*fonction, forme*), ici nous privilégions le couple (*MP, ME*), soit un couple (perception, élaboration ou projection) ou encore un couple (présent, futur).

4.1.5 Modèles et temps

Il est fort probable que les images mentales de l'architecte évoluent *réellement* de manière incessante et discontinue. Cependant, comme nous nous intéressons à théoriser la démarche de conception architecturale, et non étudier sociologiquement, ou par le prisme des neurosciences, ou d'autres sciences humaines, la pensée de l'architecte, nous nous contenterons de discrétiser l'évolution des modèles de la conception architecturale. Les processus élémentaires de la conception architecturale tels que nous les avons définis font évoluer un modèle, d'un état vers un nouvel état. Cela nous permet de rythmer la conception architecturale.

Cela revient à indexer les modèles par une suite temporelle (t_i). À chaque état t_i du processus global de conception architecturale correspond un état (MP_i, ME_i) des modèles de la conception architecturale réactualisés intentionnellement par des processus élémentaires de la conception architecturale.

Comme dans la théorie de D. Claeys, nous particularisons les états de la manière suivante :

- (MP_0, ME_0) : état initial ;
- (MP_k, ME_k) : état intermédiaire ponctuel ;
- (MP_{crit}, ME_{crit}) : état critique de pertinence, c.-à-d. un état ayant atteint une solution sous-optimale acceptable (l'architecture peut être arrêtée, nous disposons d'une orientation jugée acceptable pour permettre aux ingénieries et autres activités – développement, industrialisation. . . – de prendre place) ;
- (MP_n, ME_n) : état final.

La figure 4.3 montre la co-évolution des deux modèles (MP_k, ME_k) de la conception architecturale par l'exécution de processus élémentaires de la conception.

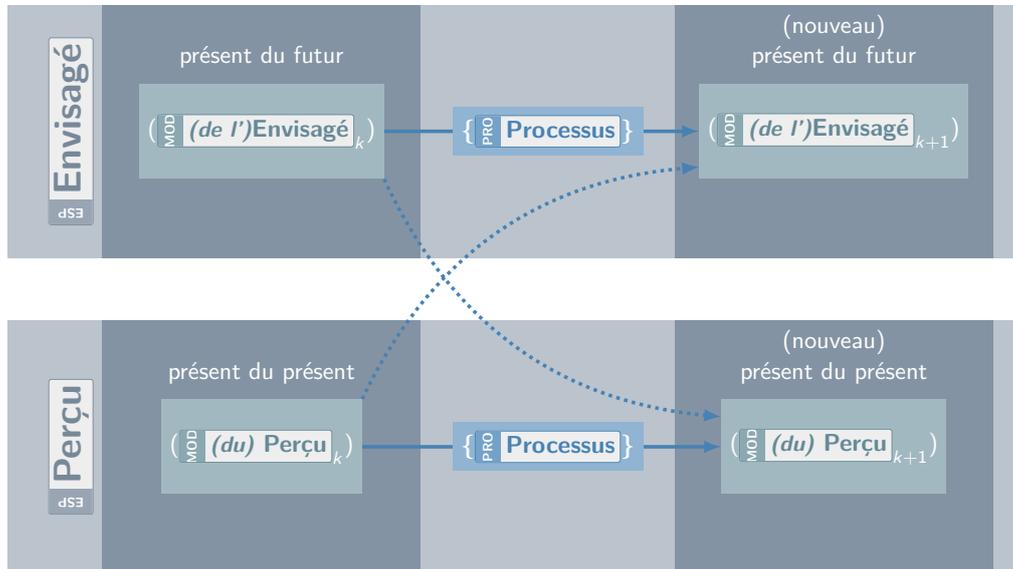


Figure 4.3: Évolution temporelle des modèles

4.1.6 Modèles et qualité

En faisant évoluer les modèles (MP_k, ME_k) de la conception architecturale, les processus élémentaires de la conception visent à améliorer la *qualité* des modèles ainsi élaborés afin d'aboutir à un modèle dont cette *qualité* sera réputée comme acceptable pour poser et décrire une solution architecturale de référence.

Comment définir la qualité d'un modèle ? Il nous semble présomptueux de la définir dans l'absolu et de manière définitive. En effet, cela enfermerait l'architecte dans une définition unique de la qualité de son travail, et supposerait que tous les domaines visés, ou tous les environnements où prendrait place de la conception architecturale de systèmes artificiels complexes partageraient la même définition de cette qualité. Nous pensons au contraire que cette définition de la qualité est du ressort de chaque opportunité ou chaque projet de conception architecturale. Elle peut, par exemple, être déterminée d'un commun accord entre l'architecte et les parties prenantes impliquées ; ou être capitalisée au sein d'une organisation et faire partie d'un référentiel d'entreprise.

Dans la suite, nous supposerons que cette notion de qualité est définie et établie. Nous donnerons seulement quelques indices préliminaires pour susciter la réflexion et suggérer des pistes pour l'élaboration et la définition particulière de cette notion de qualité. Nous ne nous placerons pas dans le cadre d'une théorie particulière et nous en tiendrons à ce stade à la définition courante des termes ou notion introduits.

Les artefacts, supports du travail de conception architectural de l'architecte, renferment un contenu informationnel. Nous chercherons à lier la notion de qualité à une évaluation de ce contenu informationnel. Voici quelques idées qui pourraient permettre de caractériser cette information.

(In)certitude : L'information est-elle certaine, ou au contraire a-t-elle un caractère probable (c'est peut-être cela, mais peut-être autre chose).

(In)précision : L'information désigne-t-elle quelque chose de net et précis (et d'unique), ou est-elle connue dans une certaine extension (un intervalle, une zone, un ensemble de possibles...), ou entachée d'erreur.

(In)complétude : Au-delà de prétendre *tout savoir*, que savons-nous, et surtout que ne savons-nous pas. Et dans ce que nous savons que nous ne savons pas, quelle part est accessible (une connaissance que l'on peut acquérir pendant le projet de conception architecturale) et laquelle restera inaccessible. Bref, quelle conscience avons-nous de ce qu'il nous manque.

Vérité : Non pas au sens de la logique, mais au sens de *conforme avec le réel*, c.-à-d. avons-nous confronté notre information avec le monde réel.

Validité : Non pas au sens de la logique, ou d'une théorie, mais pour désigner si l'information est valable (et non valide), c.-à-d. si elle amène une plus-value dans la démarche. Son contraire pourrait être insignifiant.

À cela nous pouvons ajouter la nature même de l'information, et évoquer, ici à titre d'exemple, la partition donnée/information/connaissance/sagesse (*data/information/knowledge/wisdom*) pour classer et ordonnancer qualitativement l'*information* que nous manipulons. Nous ne prétendons pas donner une définition parfaite de ces notions tant cela est difficile et controversé ([Zin07]).

Encart 4.1

[La hiérarchie DIKW]

La hiérarchie DIKW (ou bien d'autres dénominations) propose d'établir les liens supposés entre donnée, information, connaissance et sagesse. À savoir : « *l'information est définie en termes de données, la connaissance en termes d'information, la sagesse en termes de connaissance* ». Elle est une représentation usuelle en gestion de la connaissance. La représentation graphique usuelle est celle d'une pyramide (parfois appelée pyramide de la sagesse) quelquefois augmentée d'un axe qui pointe ce qui augmente en gravissant les échelons de la pyramide ([Row07])

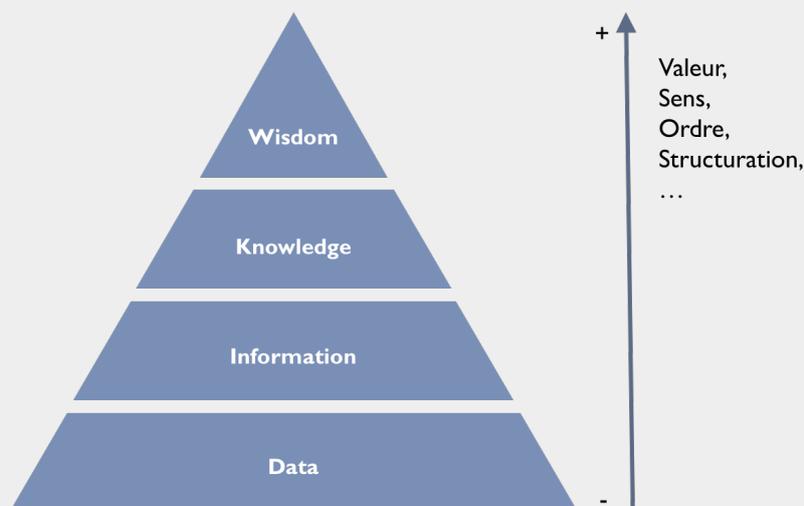
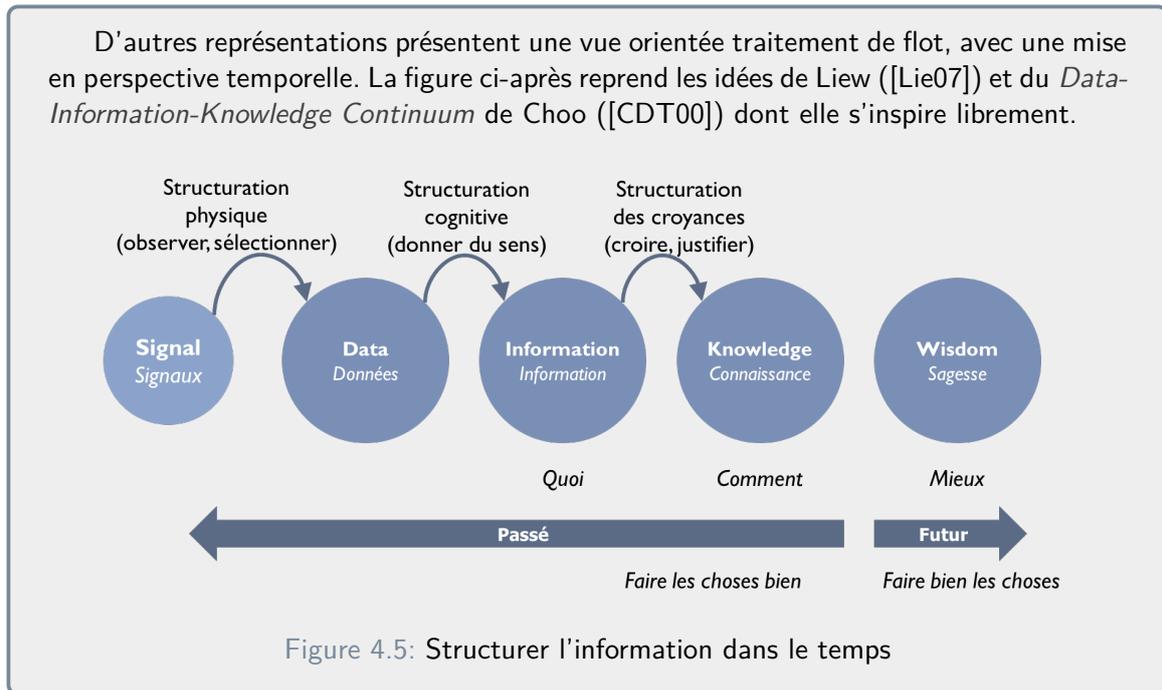


Figure 4.4: La pyramide de la sagesse



Définition 4.2

[Définir la qualité d'un modèle]

Définir la qualité d'un modèle revient à poser :

- la définition d'un ensemble non vide de caractéristiques de l'information (relative aux artefacts produits par l'architecte) ;
- le choix d'une (ou plusieurs) théorie permettant de déterminer ou d'estimer la valeur numérique des caractéristiques pour une information donnée, ou à défaut d'une méthode d'évaluation ou d'estimation de cette valeur ;
- dans le cas où l'ensemble des caractéristiques ne serait pas réduit à un singleton, la définition d'une (pseudo)norme, en considérant le vecteur des valeurs des caractéristiques.

Étant donné une définition et une acceptation de la qualité des modèles, nous pouvons caractériser les effets d'un processus élémentaire de la conception architecturale sur le modèle qu'il fait évoluer de la manière suivante :



Définition 4.3

[Effet d'un processus élémentaire de conception (1/2)]

Soit P_i un processus élémentaire de la conception agissant sur le modèle M_i , avec $i \in [1..7]$. L'effet de la transition de M_i vers M_{i+1} , résultat de l'exécution de ce processus P_i , sera dit :

- positif, si et seulement si $qualité(M_{i+1}) > qualité(M_i)$;
- négatif, si et seulement si $qualité(M_{i+1}) < qualité(M_i)$;
- neutre, si et seulement si $qualité(M_{i+1}) = qualité(M_i)$.

La nature de l'opportunité considérée, le contexte dans lequel se place la conception architecturale (par exemple, les habitudes de l'entreprise, de l'institution ou du cabinet dans lequel évolue l'architecte, les attentes ou les enjeux des parties prenantes impliquées) sont autant de facteurs qui peuvent influencer sur la définition de la qualité d'un modèle. D'autre part, chaque modèle, pas sa nature propre, appelle à des définitions de la qualité qui peuvent varier (par exemple, la qualité des modèles de la **MOD** **Forme** ou du **MOD** **Concept** pourraient être liées au nombre de propositions émises – plus nous explorons de formes ou de concepts différents, meilleure sera la confiance dans la forme ou le concept retenu – alors que la qualité du modèle du **MOD** **Comportement émergent** quant à elle tiendrait plus de sa fidélité ou de sa vérité, c.-à-d. représentative et confrontée au réel).

L'exemple ci-après se veut simplement illustratif de ce que pourrait être une définition de la qualité pour un modèle particulier. Il ne saurait être généralisé ou tenu pour référence : la définition proposée ici ne saurait être simplement étendue aux autres modèles. Si nous voulons nous doter de définitions de la qualité pour l'ensemble des modèles de la conception architecturale, nous serions appelés à spécifier sept définitions, potentiellement toutes différentes.

Exemple : qualité de la forme

Considérons le modèle **MOD** **Forme** qui contient les différentes propositions de formes architecturales envisagées, indexée par les états de la conception architecturale, les différentes propositions de solutions architecturales en matière d'éléments structurés élaborées par l'architecte. Définissons la cardinalité de la forme à un instant (t_k), que nous noterons $Card(F_k)$, comme étant la cardinalité de l'ensemble des différentes propositions. Voici ce que pourrait être une première définition de la qualité du modèle de la **MOD** **Forme**. La qualité du modèle de la forme est donnée par sa *convergence relative* (CV_k) définie comme suit :

$$CV_k = \frac{Card(F_0) + (Card(F_0) - Card(F_k))}{Card(F_0)}$$

$$= 1 + \frac{(Card(F_0) - Card(F_k))}{Card(F_0)}$$

Nous pouvons remarquer avec cette définition de la qualité qu'un architecte qui d'emblée se focaliserait sur une seule option de la forme proposée et qui la maintiendrait tout au long de sa conception architecturale, verrait la qualité de son modèle stagner à 1. En revanche cette définition ne valorise pas la taille initiale de l'ensemble des alternatives de la forme, la qualité initiale étant par définition de 1. Nous pouvons en proposer une version pondérée par la taille de l'ensemble de départ comme suit :

$$CV_k = \log(Card(F_0)) \left(1 + \frac{(Card(F_0) - Card(F_k))}{Card(F_0)} \right)$$

Notons également que cette définition suppose que $F_0 \neq \emptyset$, et que donc l'architecte dispose au moins d'une solution !

4.1.7 Modèles et organisation

Comme D. Claeys nous distinguerons trois niveaux d'organisation ou de construction des modèles, qui sont des façons d'agréger les objets, ici des artefacts :

- Un niveau de *classement* où les artefacts sont regroupés en tas, ou ensembles (une collection d'artefacts regroupés et distincts) ;
- Un niveau *structurel* où les artefacts sont reliés entre eux par différents types de relations (dont des relations d'ordre) ;
- Un niveau *système*, c.-à-d. des ensembles organisés d'artefacts reliés entre eux en interaction provoquant des émergences.

Il conviendrait de doter chacun de ces niveaux d'un fondement théorique. Il semble difficile à ce stade de statuer sur une théorie particulière : laquelle retenir, lesquelles éliminer ? Il semble même présomptueux de penser qu'une seule théorie permettra d'englober le tout et d'être en tout satisfaisante.

En revanche, pour le premier niveau, le niveau ensembliste, nécessaire dans la suite de notre propos de ce chapitre, nous avons besoin d'une formalisation, et donc de nous doter d'une théorie. La théorie des ensembles ZF (Zermelo-Fraenkel) est très largement suffisante à ce stade, nous n'utiliserons pas d'autres concepts que ceux proposés par cette théorie.

En premier lieu, un modèle tel que défini ici agrégeant des artefacts de même type, il convient de définir l'ensemble qui contient les artefacts d'un modèle.



Définition 4.4

[Ensemble des artefacts d'un modèle]

Pour un modèle M_i donné, nous noterons E_i l'ensemble (fini) des artefacts qui constituent ce modèle.

Par construction, les artefacts d'un ensemble E_i partagent tous le même type. Cet ensemble étant dérivé d'un modèle, il est appelé à évoluer au même rythme que le modèle dont il est issu au cours du processus de conception architecturale. Voir à ce sujet le paragraphe sur l'évolution dans le temps des modèles (cf. section 4.1.5 page 137).



Définition 4.5

[Surface d'un modèle]

Nous appellerons surface courante d'un modèle M_i à l'instant (t_j) la cardinalité de l'ensemble E_i des artefacts à l'instant (t_j) de ce modèle.

$$Surface(M_i) \text{ à l'instant } (t_j) = Card(E_i) \text{ à l'instant } (t_j)$$

Si tous les éléments d'un ensemble E_i des artefacts d'un modèle partagent le même type, il peut être intéressant de dégager des sous-ensembles plus précis d'artefacts ayant une coloration, ou une caractéristique particulière. Cette caractérisation se fera au travers d'*attributs*. Si les types ont été fixés (ils structurent les différents modèles, opérandes des processus élémentaires de la conception architecturale), en revanche les attributs doivent être libres et déterminés opportunément. Ce qui revient à dire qu'il s'agit là d'une tâche de l'architecte de déterminer quelles sont les caractéristiques, les colorations, les aspects pertinents à mettre en exergue. Il peut le faire en s'appuyant sur des cadres standards, ou réutilisant une connaissance accumulée lors d'expériences passées, ou bien la déterminer uniquement à partir de sa perception de l'opportunité.



Définition 4.6

[Ensemble des attributs caractérisant les artefacts d'un modèle]

Pour un modèle M_i donné, nous définissons l'ensemble A_i , l'ensemble qui regroupe les attributs définis par l'architecte pour caractériser plus précisément les artefacts de son modèle.

Cet ensemble est peuplé à la libre convenance de l'architecte et pour les besoins de sa démarche de conception architecturale. Par exemple, concernant le modèle du MOD Contexte, l'architecte peut décider :

- de ne pas particulariser ces artéfacts ($A_{contexte} = \emptyset$);
- de s'appuyer sur des cadres standards ou une connaissance capitalisée (ici il pourrait choisir le cadre PESTEL – Politique, Économique, Sociologique, Technologique, Environnemental, Légal – que nous verrons dans un chapitre ultérieur (cf. section 5.2.3 page 183) pour définir l'ensemble des attributs { 'est de nature politique', 'est de nature économique, ... });
- de définir ses propres attributs (pour un projet d'établissement d'une base vie en Antarctique [LRW11], il pourrait choisir les attributs suivants { 'est de nature climatique', 'est de nature expérimentation scientifique', 'est de nature physiologique', ... }).

Une mesure de la précision ou de la particularisation des artéfacts pourrait être le nombre d'attributs définis par l'architecte. Dit autrement le nombre de couleurs, ou d'aspects qu'il souhaite utiliser pour un modèle particulier de sa conception architecturale



Définition 4.7

[Dimensions d'un modèle]

Nous appellerons nombre courant de dimensions d'un modèle M_i à l'instant (t_j) la cardinalité de l'ensemble A_i à l'instant (t_j).

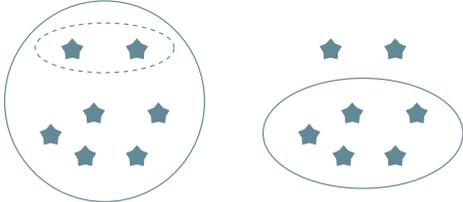
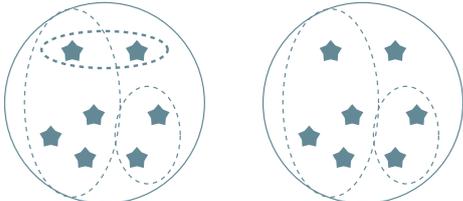
$$Dim(M_i) \text{ à l'instant } (t_j) = Card(A_i) \text{ à l'instant } (t_j).$$

Soit E_i l'ensemble des artéfacts d'un modèle M_i , et A_i l'ensemble des attributs caractérisant les artéfacts de ce modèle M_i , nous pouvons introduire quelques actions élémentaires que l'architecte peut effectuer sur l'ensemble des artéfacts d'un modèle, et donc par voie de conséquence, sur son modèle.

TABLE 4.8: Actions élémentaires sur l'ensemble des artéfacts d'un modèle

Action	Avant	Après	Description
Classement			L'ensemble des artéfacts du modèle est classé suivant les attributs définis. $\forall a \in A_i, \exists$ un ensemble E_{ai} défini par $E_{ai} = \{\text{artefact} \in E_i, a \text{ caractérise l'artefact}\}$
Expansion en surface			De nouveaux artéfacts sont incorporés. E_i à l'instant (t_{j+1}) = E_i à l'instant (t_j) \cup {nouveaux artéfacts}
Expansion en dimension			Un nouvel attribut caractérisant les artéfacts du modèle est ajouté. A_i à l'instant (t_{j+1}) = A_i à l'instant (t_j) \cup {nouveau attribut}

TABLE 4.8: Actions élémentaires sur l'ensemble des artefacts d'un modèle (suite)

Action	Avant	Après	Description
Contraction en surface			Des artefacts sont retirés du modèle. E_i à l'instant $(t_{j+1}) = E_i$ à l'instant $(t_j) \setminus \{\text{artefacts à retirer}\}$
Contraction en dimension			Des attributs caractérisant les artefacts du modèle sont retirés. A_i à l'instant $(t_{j+1}) = A_i$ à l'instant $(t_j) \setminus \{\text{attributs à retirer}\}$

4.1.8 Processus et opérations

Les processus élémentaires de la conception architecturale agissent sur les modèles et les font évoluer. Un processus est l'enchaînement, ou plutôt l'imbrication cohérente d'opérations, ici des opérations dites de conception architecturales. Nous n'identifierons pas, ni ne détaillerons, les différentes opérations possibles, mais définirons seulement une opération de la conception architecturale de manière générique, comme subsumant toute opération possible. En particulier, subsumant les opérations élémentaires suivantes :

- l'identification initiale du contenu du modèle (et en particulier la détermination de ses *dimensions* initiales, (cf. tableau 4.8 page 143));
- la définition et la spécification de ce contenu (avec entre autres le *classement* des artefacts, (cf. tableau 4.8 page 143));
- les différentes modification ou remise à jour des artefacts contenus dans le modèle, à savoir (cf. section 3.3 page 97) :
 - la *reformulation* : le contenu de l'artéfact considéré n'est pas changé, mais il est exprimé, bref modélisé différemment ;
 - l'*évolution* : le contenu de l'artéfact considéré, qui était dans un certain état a changé pour atteindre un nouvel état, sans que pour autant nous soyons capable d'explicitier clairement ce qui est advenu lors de la transition ;
 - la *transformation* : l'atteinte d'un nouvel état du contenu dde l'artéfact considéré est le résultat explicite d'une opération ou d'une activité de transformation, ou d'une succession ou d'un enchevêtrement d'opérations ou d'activités de transformation élémentaires ;
- l'*expansion* du modèle (cf. tableau 4.8 page 143), que cela soit en surface ou en dimension, soit par incorporation de nouvelles informations, soit par génération de nouvelles idées, concepts... bref de nouveaux artefacts ou de nouveaux attributs ;
- la *contraction* du modèle (cf. tableau 4.8 page 143), en surface ou en dimension, par élimination ou rejet de contenu (attributs ou artefacts).

4.1.9 Processus et modèles

Un processus élémentaire de la conception architecturale faisant évoluer un modèle de la conception, ces processus se répartissent de la manière suivante :

TABLE 4.9: Modèles et Processus

le modèle. . .	évolue grâce au processus. . .
<p>MOD (du) Perçu</p> <p>MOD But</p> <p>MOD Contexte</p>	<p>PRO Désignation</p> <p>PRO Contextualisation</p>
<p>MOD (de l')Envisagé</p> <p>MOD Capacité</p> <p>MOD Comptement attendu</p> <p>MOD Forme</p> <p>MOD Comportement émergent</p> <p>MOD Concept</p>	<p>PRO Détermination</p> <p>PRO Clarification</p> <p>PRO Proposition</p> <p>PRO Simulation</p> <p>PRO Prospection</p>

Définissons brièvement ces processus élémentaires.

ESP Perçu

Les processus élémentaires œuvrant sur les modèles de l'espace perçu.

PRO Désignation

Ce processus permet à l'architecte d'appréhender et comprendre le but assigné, ce que les architectures qu'il va proposer devront viser.

MOD But_k → **PRO** Désignation → **MOD** But_{k+1}

PRO Contextualisation

Ce processus permet à l'architecte de construire et rafraîchir le contexte, ou plutôt les contextes dans lesquels le projet d'architecture visé doit s'insérer. C'est le résultat de la *lecture du monde* opéré par l'architecte.

MOD Contexte_k → **PRO** Contextualisation → **MOD** Contexte_{k+1}

ESP Envisagé

Les processus élémentaires œuvrant sur les modèles de l'espace de l'envisagé

PRO Détermination

Ce processus permet à l'architecte de déterminer quelles sont les capacités visées par l'architecture (ce que l'on nomme parfois *analyse capacitaire*) et éventuellement leurs ordonnancements en termes d'incréments capacitaires envisagés.

MOD Capacité_k → **PRO** Détermination → **MOD** Capacité_{k+1}

PRO Clarification

Ce processus permet à l'architecte de clarifier la détermination des capacités au travers de l'explicitation des effets provoqués et des comportements attendus par la réalisation des dites capacités.

MOD Comptement attendu_k → **PRO** Clarification → **MOD** Comptement attendu_{k+1}

PRO Proposition

Ce processus permet à l'architecte de proposer des formes possibles de la solution en termes d'architecture.

MOD Forme_k → **PRO** Proposition → **MOD** Forme_{k+1}

PRO Simulation

Ce processus permet à l'architecte de solliciter la ou les formes envisagées (au travers de divers moyens qu'ils soient purement une délibération intellectuelle, ou l'exécution d'une simulation informatique) afin de prédire le comportement ou les effets que de telles formes pourraient engendrer.



PRO Prospection

Cette opération permet à l'architecte d'explorer et prospecter l'espace des concepts s'offrant à lui pour répondre à la situation étudiée, et trouver ainsi le principe architectural qui permettra de tenir l'ensemble des éléments de l'architecture et lui assurer son intégrité.



Comme dans le cas des modèles, nous introduisons et utiliserons pour la facilité d'expression des processus (par abus de langage) qui sont la liste composée de l'énumération d'un certain nombre de processus élémentaires.

TABLE 4.10: Synthèse des processus élémentaires de la conception architecturale

le PRO Processus (par abus de langage)	est la liste composée de l'énumération des PRO Processus suivants...
PRO Perception	PRO Désignation, PRO Contextualisation.
PRO Élaboration	PRO Détermination, PRO Clarification, PRO Proposition, PRO Simulation, PRO Prospection.

4.2 Démarche de conception architecturale

4.2.1 Conceptualisation

La modélisation et la structuration de la démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes sont construites suivant quelques préceptes.

- Nous acceptons qu'il n'existe pas de sérialisation unique et définitive du processus de conception architecturale (cf. section 1.3.3 page 42). Tout énoncé temporellement et causalement ordonné d'activités s'enchaînant ne relaterait qu'une conception architecturale particulière. Le processus qui vise l'architecture se révèle être une aventure à chaque fois renouvelée et qui nous semble plus convenablement représentée par le *Design Squiggle* de Damien Newman (cf. section 1.3.2 page 31). Fort de ce constat, nous serons plutôt amené à proposer des principes, voire un méta-processus pour écrire et partager l'histoire de chaque conception, en sus d'une trame générique mais qui sera forcément réduite et simplifiée.
- Nous nous plaçons délibérément dans la posture 3 des caricatures de Jones (cf. section 1.3.1 page 18), c.-à-d. celle d'un architecte auto-organisé. Tout comme D. Claeys, nous souhaitons donner une place prépondérante à l'architecte. Nous ne saurions concevoir de démarche de conception architecturale

hors de la présence de l'architecte (ce que pourtant s'autorise le standard ISO/IEC/IEEE 42020 [ISO17] sur les processus d'architecture, en ne citant l'architecte explicitement que comme participant des revues - *sic*!).

- Nous reconnaissons que différents niveaux de modélisation de cette démarche de conception sont nécessaires. Pour cela nous nous inspirerons fortement des niveaux de modélisation heuristique des processus de (co)conception de D. Claeys. Et comme chez ce dernier, la structuration en différents espaces nous invite à une distribution des activités suivant ces espaces.
- Et au risque de nous répéter, nous insistons sur le fait que la démarche de conception architecturale n'est pas une démarche de résolution de problèmes (ou d'ingénierie). C'est une démarche qui, partant de la perception du présent, envisage des futurs possibles et plausibles. Le modèle ^{MOD}(du) Perçu est bel et bien l'interprétation que nous nous faisons de la situation courante, le modèle ^{MOD}(de l')Envisagé, la projection d'un ou de futurs modifiés par notre conception architecturale.

Nous aboutissons à une proposition de démarche de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes agencée et étagée sur quatre niveaux.

Niveau archétypal	La démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes semble obéir à un certain nombre de grands principes récurrents, que nous retrouvons dans différentes formes de conceptions (cf. section 1.3.3 page 43). Nous pensons que l'ensemble de ces principes forme un archétype de la conception architecturale.
Niveau général	Les différents espaces permettent de dessiner un niveau de démarche générale de la conception architecturale comme étant la conjonction complexe de plusieurs processus formant l'ossature de cette démarche.
Niveau particulier	Dans ce niveau, il n'y pas d'histoire pré-écrite ni d'enchaînement prédéfini. Chaque projet architectural voit la mise en œuvre d'opérations de la conception architecturale au travers des divers processus, sans ordre prédéfini ni enchaînement préétabli. De manière située, l'architecte décide de ce qu'il juge comme étant la meilleure action tactique, et s'adapte au fur et à mesure. En revanche, disposer d'un bagage de processus et d'opérations doit permettre de verbaliser le chemin parcouru ou celui à parcourir tel qu'entrevu.
Niveau <i>boîte à outils</i>	L'architecte étant un élément central de la conception architecturale, des opérations cognitives propres participent de la conception architecturale. En étant à la fois acteur et observateur, l'architecte se remet en cause, se questionne, et prend des décisions, des orientations. Pour cela, il peut puiser dans un certain nombre d'opérations, de raisonnement, de démarches... , bref une boîte à outils, peuplée d'outils intellectuels tels le jugement, l'abstraction, la décision, l'analyse, la synthèse.

4.2.2 Archétype de la conception architecturale

Les différents caractères distinctifs du processus de conception ont été évoqués dans les prolègèmes (cf. section 1.3.3 page 43). Nous les regroupons ici pour former l'archétype de la conception architecturale.



Définition 4.8

[Archétype de la conception architecturale]

La conception architecturale des systèmes artificiels complexes est une démarche **située, holistique, itérative**, globalement **convergente**, localement **respirante, zigzagante**, intégrant les parties prenantes dans une (co)conception **visant l'architecture**.

Reprenons un à un ces différentes caractéristiques et mettons-les en lumière de notre proposition de paradigme de la conception architecturale défini dans la section précédente (cf. section 4.1 page 128).

<p>situé</p> <p style="color: #c08040; font-size: small;">L'intrication des espaces en perpétuelle évolution</p> <p style="color: #c08040; font-size: small;">L'architecte pièce centrale de la démarche</p>	<p>Les différents espaces concrétisent l'environnement dans lequel évolue l'architecte, et son côté non séparé de son contexte. En particulier, la partition entre monde interne et monde externe de la conception (cf. tableau 4.3 page 131), ainsi que la répartition temporelle des espaces (cf. tableau 4.2 page 131) montrent que nous ne pouvons extraire et séparer la conception architecturale de son contexte. D'autre part, le côté anthropocentrique que nous avons insufflé dans la construction du paradigme, en incorporant délibérément l'architecte et sa connaissance, a une conséquence immédiate. La même opportunité traitée par deux architectes différents (ou deux équipes d'architecture différentes), ou par le même architecte (ou la même équipe d'architecture), mais à des instants différents, n'aboutira pas à la même solution architecturale. Le travail de conception architecturale prend place dans une continuité temporelle, à un moment précis, avec certaines connaissances, certaines ressources accessibles et un architecte dans une <i>situation</i> donnée.</p>
<p>holistique</p> <p style="color: #c08040; font-size: small;">Des opérations de portée globale</p>	<p>La construction des opérations de conception architecturale s'effectue dans un cheminement holistique (cf. section 4.1.1 page 128). Elle se solde par une proposition d'un ensemble d'opérations opérant sur les modèles dans leur ensemble, et non sur des sous-ensembles ou des partitions. Comme vu section 4.1.5, la conception architecturale agit en considérant les modèles (<i>MP</i>, <i>ME</i>) dans leur intégralité.</p>
<p>itératif</p> <p style="color: #c08040; font-size: small;">les modèles évoluent itérativement, non incrémentalement...</p>	<p>La conception architecturale est rythmée par des états successifs des modèles. À chaque état t_i du processus de conception architecturale correspond un état (MP_i, ME_i) des images mentales de l'architecte réactualisé intentionnellement par des opérations de la conception architecturale. Cette discrétisation temporelle concrétise le côté itératif de la démarche. Chaque itération voit se répéter des opérations de mise à jour des modèles dans leur ensemble. En cela, la démarche est bien itérative et non incrémentale : les modèles sont bâtis et considérés dans leur ensemble et non bout par bout.</p>
<p>convergent</p> <p style="color: #c08040; font-size: small;">... pour converger vers un niveau critique d'orientation de la solution</p>	<p>Doter les modèles de la notion de qualité, en assumant à ce stade le caractère informel et encore relativement indécis de cette notion, permet néanmoins d'objectiver la convergence des itérations. Nous pourrions adopter une définition de la convergence² suivante, supposant que nous avons préalablement établi la définition des qualités des modèles (cf. section 4.1.6 page 138).</p>

2. Le terme de convergence peut prêter à controverses. Nous l'adoptons car il est majoritairement employé dans la littérature. Formellement, nous devrions lui préférer des termes comme « *progression* », « *atteinte de la satisfaction* » ou « *stabilisation globale* ».



Définition 4.9

[Convergence de la conception architecturale]

La conception architecturale est dite convergente vers une qualité Q , où $Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_7)$ si :

- à partir d'un certain nombre d'itérations n , $qualité(MP_n, ME_n) \geq Q$, et
- toute itération complémentaire ne dégrade pas ce seuil, c.-à-d. $\forall p > n, qualité(MP_p, ME_p) \geq Q$.

Chaque itération devrait voir l'exécution de processus élémentaires aux effets positifs (cf. définition 4.3 page 140). Si c'est le cas, alors la convergence sera dite *monotone*.

respirant

Avancer dans la conception architecturale ne peut se résumer par inlassablement raffiner (ou décomposer) ce qui nous avons précédemment. Cette démarche aurait ici deux limitations qui enrayeraient, voire condamneraient la convergence de la conception.

- Elle supposerait que le problème est bien posé dès le départ, et que donc les transformations successives des prémisses aboutiraient à une solution (c.-à-d. que la solution serait contenue dans les prémisses et qu'un raisonnement déductif suffirait à la révéler).
- Elle n'échapperait pas à l'effet GIGO³.

Chaque itération crée et incorpore de l'information nouvelle, puis sélectionne et ne garde que celle jugée significative...

Si la conclusion d'une itération devait se solder par l'amélioration de la qualité des modèles architecturaux, exécuter une itération se fera en injectant des informations nouvelles, et donc potentiellement en introduisant localement des informations inutiles, incertaines, inappropriées... qui nécessiteront un filtrage approprié. Itérer dans le processus de conception architecturale ne consiste pas à épuiser les informations dont nous disposons, mais à en introduire de nouvelles au fur et à mesure, puis ne retenir que celles qui nous semblent pertinentes. Nous pouvons prendre l'analogie de la respiration : de l'air *neuf* est inhalé (inspiration), puis filtré (nous puisons l'oxygène nécessaire), et enfin les résidus sont expulsés (expiration). Cette analogie doit nous servir pour conduire nos itérations. Nous montrerons qu'il existe des formes canoniques d'une itération, et nous en privilégierons une en particulier.

zigzagant

Que nous adoptions la partition intentionnel/structurel, partition classique dans les approches de conception en ingénierie des produits ou des systèmes, ou celle mise en avant ici, c.-à-d. perception/prospection, ces deux univers se doivent d'être construits conjointement et de manière concourante par des mécanismes d'aller-retour. Nous parlerons alors de co-construction. Il s'agit là de :

- refuser une posture purement analytique face à la complexité qui chercherait à l'affronter en commençant par la décomposer en plus petits morceaux ;
- lutter contre notre tendance au principe de *depth first* mis en avant par Alan Newell dans sa théorie unifiée de la cognition [New94], et favoriser la règle empirique du *no fly to solution* [Peu14].

... navigue entre présent et futurs...

Les allers-retours incessants entre perception du présent et élaboration du futur permettent de co-construire les modèles de manière cohérente et équilibrée. Mieux nous percevons le présent, plus pertinent nous devenons dans l'élaboration de futurs pos-

3. "garbage in, garbage out", littéralement « ordures à l'entrée, ordures à la sortie » traduit l'idée que si les entrées d'un processus sont mauvaises, les sorties le sont forcément aussi.

sibles et plausibles. Et plus nous anticipons des futurs possibles et plausibles, plus cela nous interroge sur notre perception du présent. C'est pour cela que nous avons posé qu'une itération de conception architecturale fait co-évoluer à la fois le modèle **MOD (du) Perçu** et le modèle **MOD (de l')Envisagé**, et que cette évolution se fait en ayant connaissance réciproque des modèles (cf. figure 4.3 page 138). De plus ces allers-retours entre présent et futurs obligent l'architecte à jouer sur l'interaction entre les deux, le passage de l'un à l'autre. Ce travail accru sur la transition entre présent et futurs doit permettre de penser le changement et la manière de le réaliser.

visant l'architecture Nous reprenons à notre compte un des préceptes majeurs de D. Claeys : « [...] *les architectes ne font pas l'architecture, ils construisent des architectures. Par contre, lorsqu'ils conçoivent ou qu'ils construisent des architectures, ils visent l'architecture. Le concept d'architecture désigne donc un domaine de connaissances, construit et sans existence réelle, tandis que les architectures désignent des édifices. Entre les deux, nous situons la conception architecturale qui vise le domaine, pour concevoir les édifices* » [Cla11] que nous appliquons ici, non pas aux édifices, mais aux systèmes artificiels complexes.

... pour guider les parties prenantes vers l'architecture.

4.2.3 Niveau général

De l'agencement des espaces et du respect de l'archétype énoncé précédemment, nous pouvons proposer un niveau général de la démarche de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes. Notre approche est fondée sur une partition présent-futur, ce qui nous a amené à distinguer deux espaces (**ESP Perçu** et **ESP Perçu**), deux modèles (**MOD (du) Perçu** et **MOD (de l')Envisagé**) ainsi que deux processus (**PRO Perception** et **PRO Élaboration**).

Processus centraux

En première approche, nous pouvons poser que le niveau général de la démarche de conception architecturale repose sur deux processus opérants et conjoints.

PRO Perception

Ce processus permet de construire et de faire évoluer la perception de l'architecte. *A priori* l'architecte démarre une nouvelle opportunité avec une perception limitée, voire inexistante (c.-à-d. les informations peuplant le modèle **MOD (du) Perçu** sont ténues), et au fur et à mesure de la progression de la conception architecturale, l'architecte se doit d'améliorer sa perception, bref d'étendre les informations, tant en volume qu'en qualité, contenues dans le modèle **MOD (du) Perçu**. Tout en visant une amélioration de la qualité du modèle (convergence de la conception), cette activité est globalement expansive.

PRO Élaboration

Ce processus permet de construire et de faire évoluer les propositions de l'architecte comme futurs possibles et plausibles, c.-à-d. ses propositions de solutions architecturales. Au démarrage, en l'absence d'une perception et d'une compréhension fine de l'opportunité, et en l'absence d'une exploration ou prospection, l'univers des possibles qui s'offre à l'architecte est étendu, voire infini. Ce qui revient à dire, que son modèle **MOD (de l')Envisagé** bien qu'imprécis, devrait être très vaste, même si l'architecte n'en a pas forcément conscience, ou se trouve dans l'incapacité d'explicitier cet ensemble des possibles (ni en extension, ce qui serait fastidieux, voire impossible, ni en compréhension ce qui signifierait que l'architecte disposerait alors d'un modèle abstrait

de l'ensemble des solutions possibles). Nous pouvons résumer cela par l'aphorisme suivant : « *Au début, tout est possible, mais tout est flou* ». Le travail du processus d'**PRO Élaboration** devrait permettre d'affiner, de clarifier au fur et à mesure le modèle **MOD (de l')Envisagé** pour viser une orientation de l'architecture acceptable par l'ensemble des parties prenantes (et donc en rejetant au fur et à mesure les alternatives qui ne le sont pas).

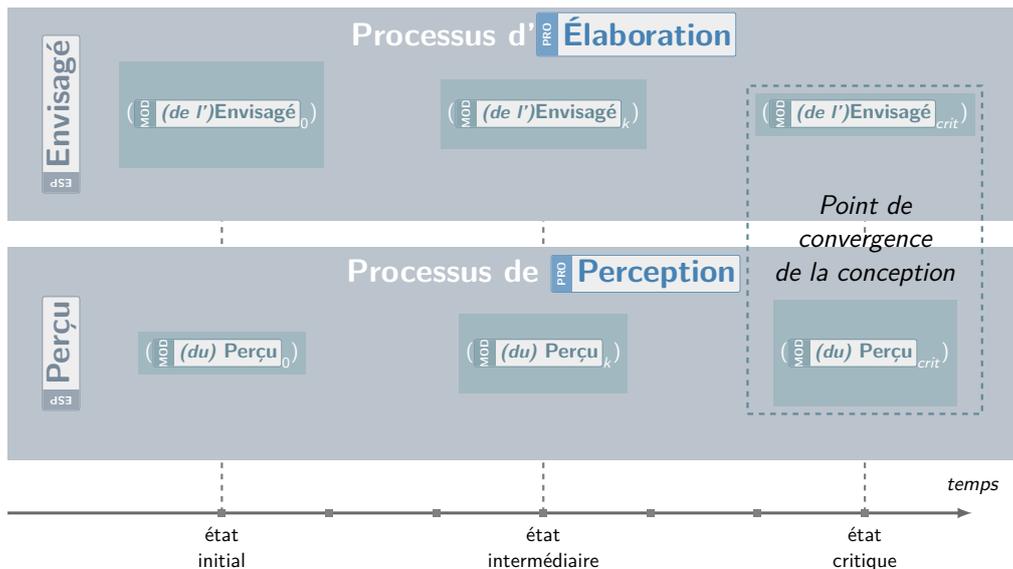


Figure 4.6: Niveau général de la démarche de conception architecturale, processus opérants

Nous venons d'entrevoir qu'au-delà de la qualité d'un modèle qui sert à mesurer la convergence, il y a une évolution de la cardinalité des informations peuplant ces modèles au cours des itérations. Les définitions posées sur l'organisation des modèles (cf. section 4.1.7 page 141) permettront de formaliser cette évolution. Nous verrons cela plus en détail dans un paragraphe suivant (cf. section 4.2.5 page 161).

D'autres processus se doivent de venir compléter le jeu des processus de la conception qui oscillent entre la perception et l'envisagé. Bien que centraux et opérants, si nous nous contentions des deux processus précédents (**PRO Perception** et **PRO Élaboration**), cela enfermerait le travail de conception architecturale dans un système semi-clos : au travers de la **PRO Perception**, l'architecte absorberait certaines informations des espaces **ESP Réel**, **ESP Infosphère** et **ESP Ressources**, et au travers de l'**PRO Élaboration** envisagerait des nouvelles potentialités, mais n'échangerait rien avec l'extérieur. *A contrario*, la conception architecturale des systèmes artificiels complexes se doit d'être un système ouvert (elle échange avec l'extérieur) et régulé (elle possède des mécanismes de contrôle et pilotage).

En s'inspirant des modèles des boucles de régulation en automatique, nous pouvons proposer la modélisation suivante en schéma blocs (cf. figure 4.7 page suivante) du niveau général de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes comme étant un système bouclé et régulé. Ceci nous permet de placer les processus de **PRO Perception** et **PRO Élaboration** comme les processus opérants de la conception architecturale, d'ajouter le processus de **PRO Description** comme produisant une sortie exploitable

par les parties prenantes impliquées de la démarche de conception architecturale, et enfin d'introduire deux nouveaux processus connexes, le **PRO** **Cadrage/Pilotage** et la **PRO** **Validation**, nécessaires au bouclage et à la régulation de la conception architecturale.

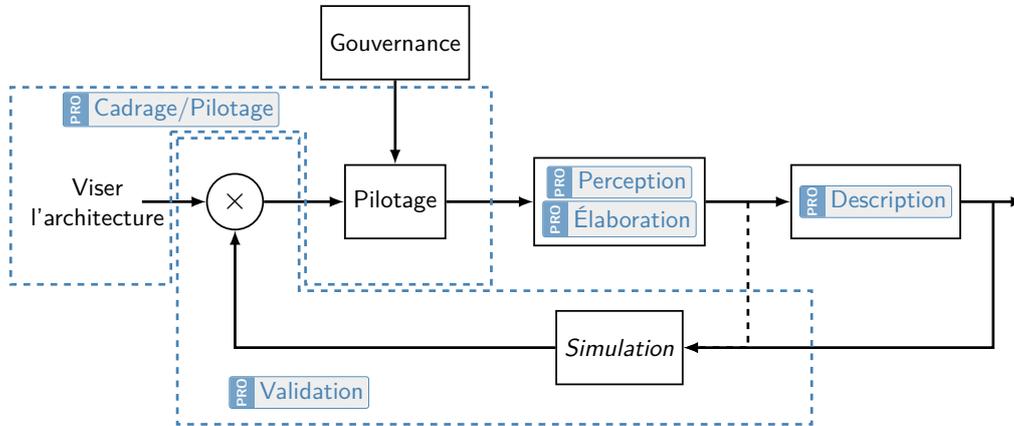


Figure 4.7: Les processus du niveau général formant un système bouclé et régulé

Notons enfin, qu'il est souhaitable que ce système régulé soit également gouverné comme le prescrit d'ailleurs le standard ISO/IEC/IEEE 42020 [ISO17].

Nous allons maintenant introduire les processus complémentaires de la conception architecturale permettant d'en faire un système ouvert et régulé.

Description

L'échange vers l'extérieur se fera au travers de l'espace dédié **ESP** **Intermédiaire**, en s'appuyant sur des **MOD** **Média**. L'activité qui permettra de construire et d'entretenir ce **MOD** **Média**, et ainsi de rendre compte de l'état et des évolutions des modèles **MOD** **(du) Perçu** et **MOD** **(de l')Envisagé** est le processus de **PRO** **Description**.

La description d'architecture est un sujet florissant. Nous renvoyons le lecteur à l'annexe (cf. annexe C page 229) que nous lui avons consacré.

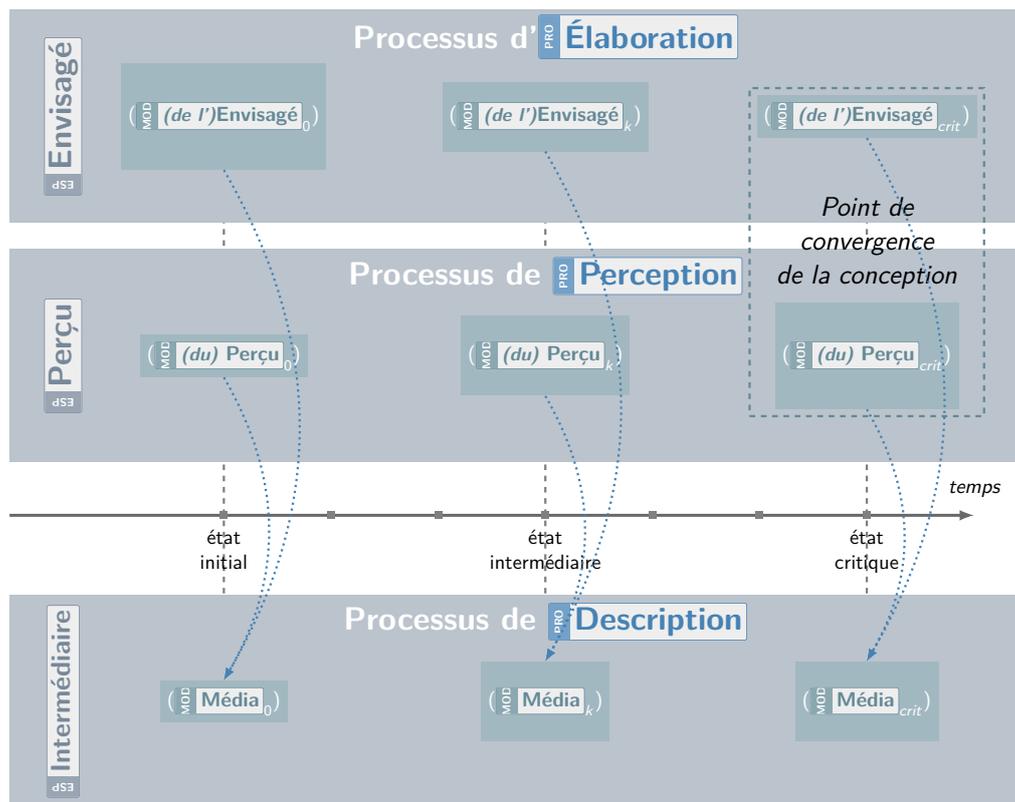


Figure 4.8: Niveau général de la démarche de conception architecturale, description

Cadrage et Pilotage

La démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes se doit d'être :

- *cadrée*, pour ne pas partir dans toutes les directions mais être conscient de l'objectif à atteindre, des ressources dont nous disposons pour y arriver, des enjeux, des aspects dimensionnants... ;
- *pilotée*, pour au fur et à mesure des itérations et des respirations, être sûr que nous restons dans le cadre que nous nous sommes fixé, apprécier l'avancement du travail et apporter si nécessaire des correctifs.

Le processus de **PRO Cadrage/Pilotage** va porter ses objectifs. Il fait évoluer pour cela, comme les autres processus élémentaires, un modèle (le modèle du **MOD Cadrage/Pilotage**) contenant les différents artefacts produits soit par l'architecte, soit par les parties prenantes impliquées, et partagés entre eux.

Nous avons introduit précédemment (cf. section 2.3.1 page 59) un certain nombre de notions qui caractérisaient l'architecture et la distinguaient de l'ingénierie. Gageons que la plupart de ces notions permette de déterminer les dimensions du modèle du **MOD Cadrage/Pilotage**. Rappelons-les pour mémoire.

- attente principale (de la part des parties prenantes)
- contrainte majoritaire
- décision architecturale
- moteur de la conception (*architectural driver*)
- points clé
- point critique

Toujours dans l'optique de cadrer, puis de piloter la démarche de conception architecturale, la détermination de la qualité requise des différents modèles, ainsi que la connaissance du temps et des ressources disponibles pour atteindre l'état critique de pertinence, viendront certainement compléter et alimenter le processus de **PRO Cadrage/Pilotage**.

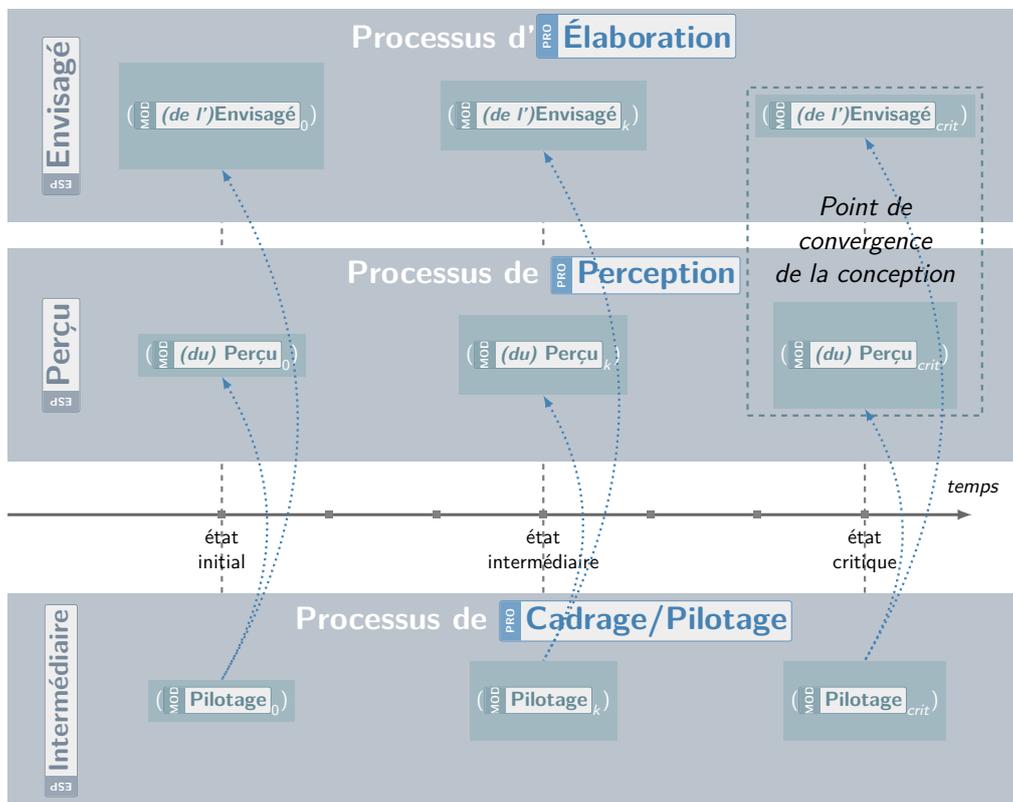


Figure 4.9: Niveau général de la démarche de conception architecturale, pilotage

Validation

Le processus de **PRO Validation** de l'architecture va globalement consister à chercher à démontrer que les résultats obtenus par la conception architecturale conduisent effectivement aux résultats escomptés, c.-à-d. qu'elle vise l'architecture. Nous ne développerons pas les différentes opérations que cela recouvre, encore moins les méthodes et approches pour procéder à une validation en bonne et due forme. Nous dirons simplement que les artefacts produits et manipulés par ce processus de **PRO Validation** viennent peupler le modèle de **MOD Validation**, et nous nous contenterons de l'explicitation suivante :

À partir des modèles architecturaux courants ($MOD (du) Perçu$, $MOD (de l')Envisagé$), décrits et exhibés au travers de médias ($MOD Média$), la validation confrontera ces résultats partiels et intermédiaires avec le réel ($ESP Réel$), et en particulier les parties prenantes, en s'appuyant potentiellement sur les ressources et la connaissance accessible ($ESP Infosphère$, $ESP Ressources$).

Sans entrer dans les explications détaillées, énonçons deux grandes classes d'approches pour procéder à une validation de la conception architecturale :

- la représentation au travers du **MOD Média** de la perception de la situation (**MOD (du) Perçu**) et des futurs envisagés (**MOD (de l')Envisagé**) suffit pour délibérer sur le statut valable ou non des résultats produits ;
- des ressources de l'espace des **ESP Ressources** (exécution de programmes informatiques, maquette, expérimentation...) sont mobilisées pour supporter la délibération.

Nous engloberons ici sous le terme de *simulation* le fait d'utiliser des modèles (soit directement les **MOD Média**, soit des artifices tels que programme informatique, maquette... de l'espace des **ESP Ressources**) à des fins de projections prospectives. Nous déplaçons ici légèrement une des définitions de *simulation* donnée par le [Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française] : « Reproduire artificiellement une situation réelle à des fins de démonstration ou d'explication. » que nous adaptons en « Pré-produire artificiellement des situations envisagées futures à des fins de démonstration ou d'explication. »

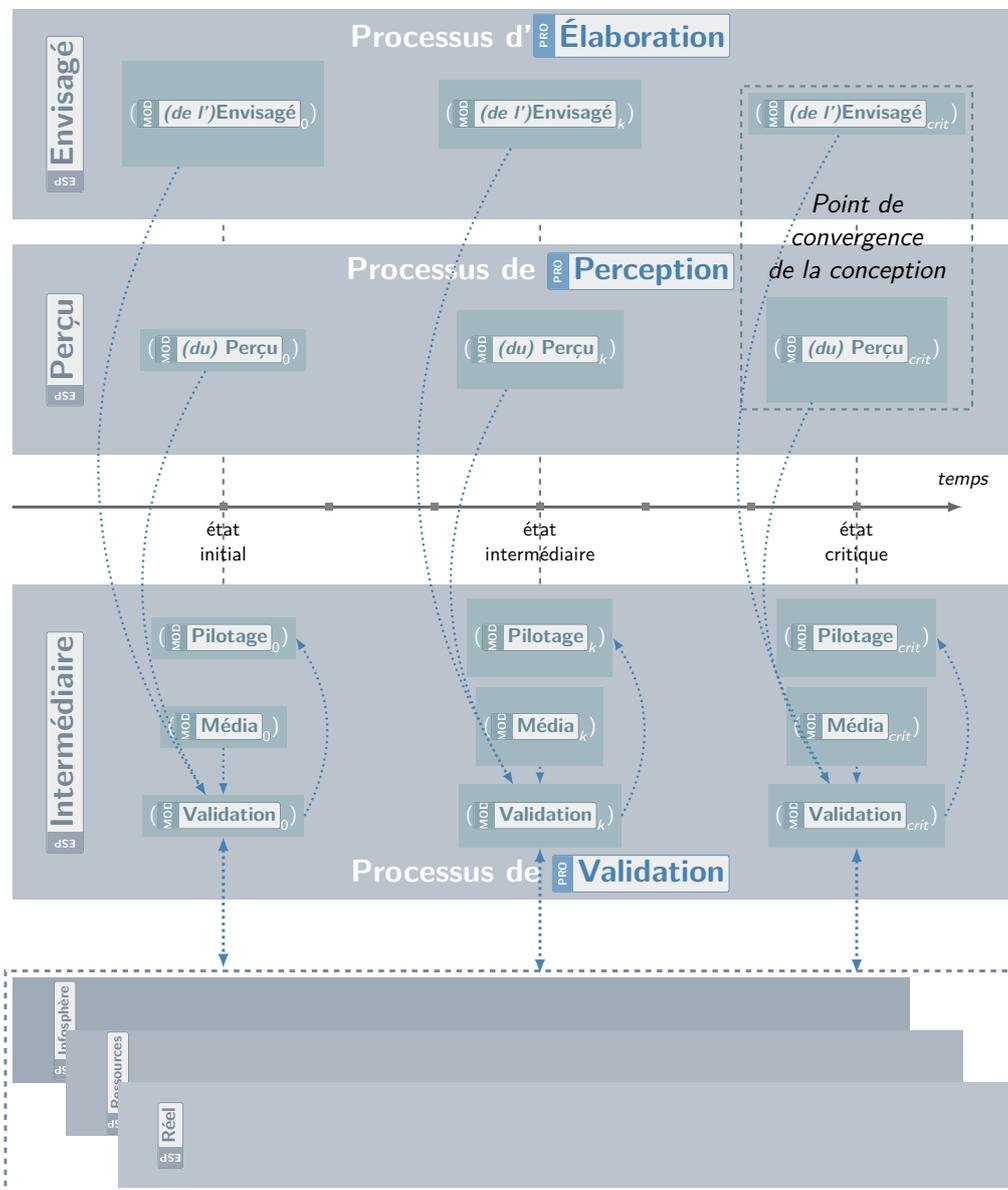


Figure 4.10: Niveau général de la démarche de conception architecturale, validation

4.2.4 Retour sur la respiration

Nous allons nous intéresser et mettre en exergue un aspect significatif de la conception architecturale, son côté respirant. La démarche de conception architecturale (cf. figure 4.6 page 151) vise à atteindre un point de convergence, c.-à-d. un état critique des modèles manipulés ayant atteint un niveau de qualité voulu. Ce processus de convergence est itératif. Chaque itération donne lieu à une ou plusieurs *respirations*. La figure ci-après replace ces différentes notions de convergence, itérations et respirations illustrées dans le cas d'une convergence monotone.

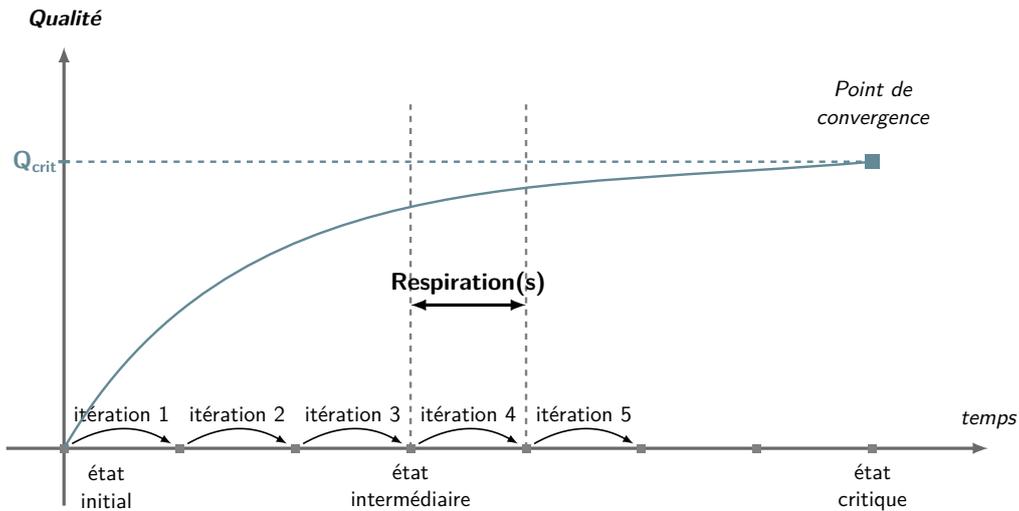
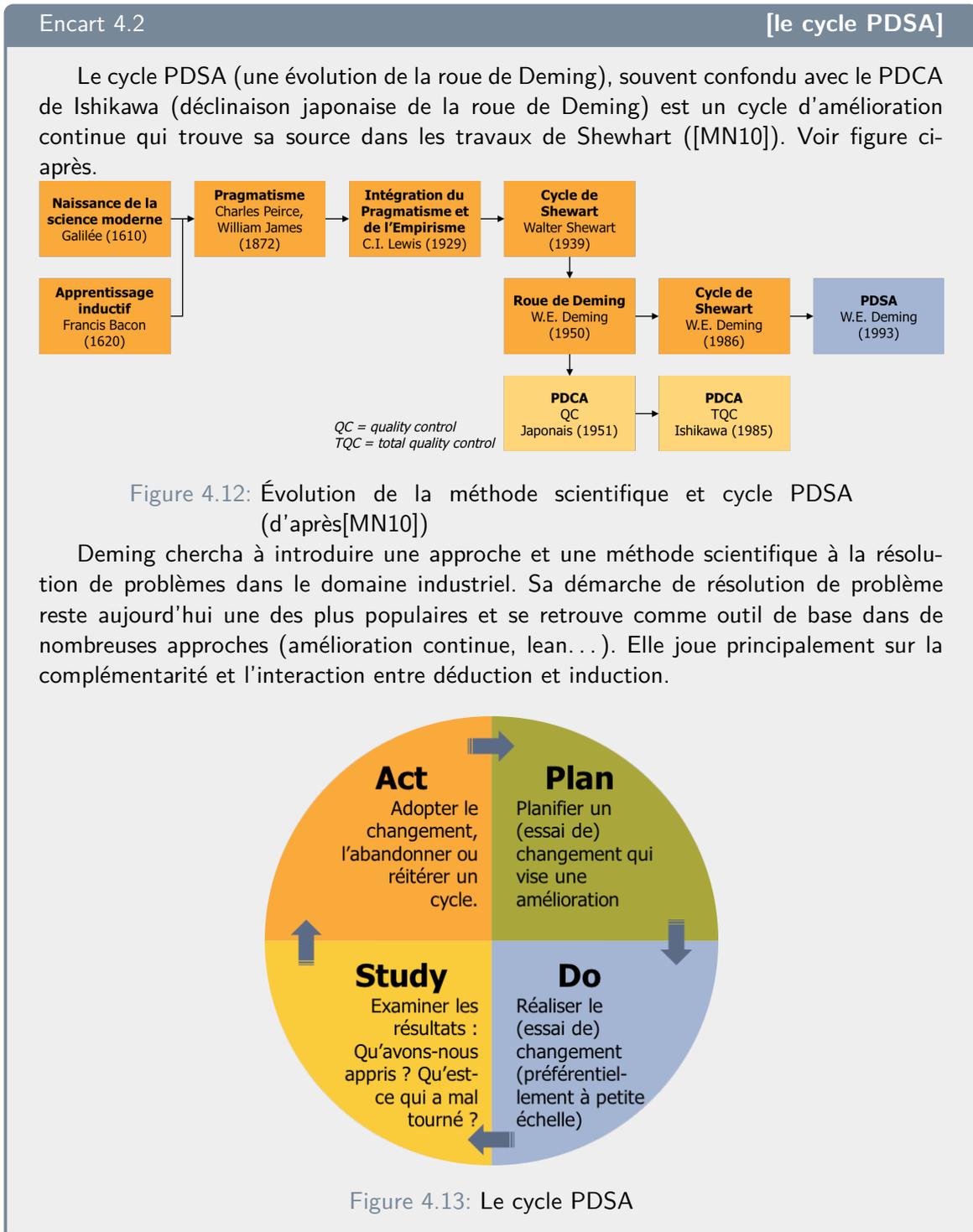


Figure 4.11: Convergence, itérations et respiration

Pouvons-nous trouver des formes canoniques de ces respirations? Deux formes *classiques* peuvent prétendre à être candidates : la boucle PDSA et la boucle OODA.



Nous ne retiendrons pas ce cycle comme étant une forme canonique d'une respiration pour deux raisons majeures. Premièrement, il s'agit principalement d'une démarche de résolution de problèmes. Or, et c'est un de nos postulats de départ, la démarche de conception architecturale n'en est pas une. Deuxièmement, elle est essentiellement basée sur le couple (induction, déduction) alors que nous avons posé l'inférence abductive comme étant l'inférence majeure dans la démarche de conception architecturale.

Encart 4.3

[la boucle OODA]

La boucle OODA (*Observe - Orient - Decide - Act*) est une approche pour prendre des décisions dans l'incertain. Elle a été développée par John Boyd, un colonel, stratège militaire, de l'armée de l'air des États-Unis, qui combattit durant la guerre de Corée. Il fut un des premiers à formaliser les tactiques de combat en se basant sur un schéma conceptuel : la boucle OODA.

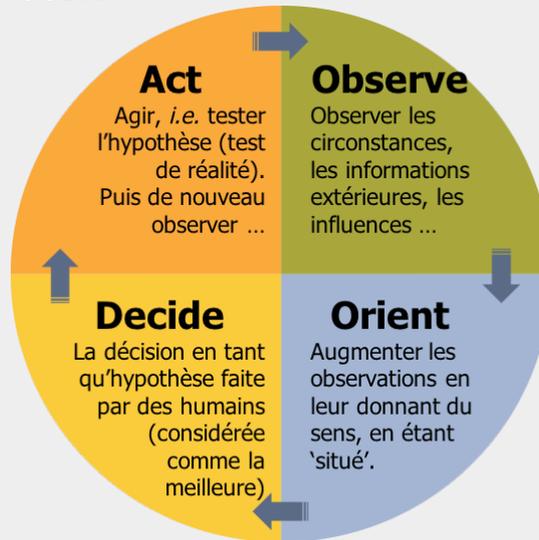


Figure 4.14: Le cycle OODA

Depuis, elle s'est diffusée dans de nombreux domaines, ne se restreignant pas à un outil d'aide, voire proposant une démarche complète de prise de décision. Elle peut également être vue comme un processus d'apprentissage, une manière d'avancer dans l'inconnu et d'affronter l'incertain. La boucle initiale a été complétée et détaillée par Boyd pour aboutir au schéma ci-après.

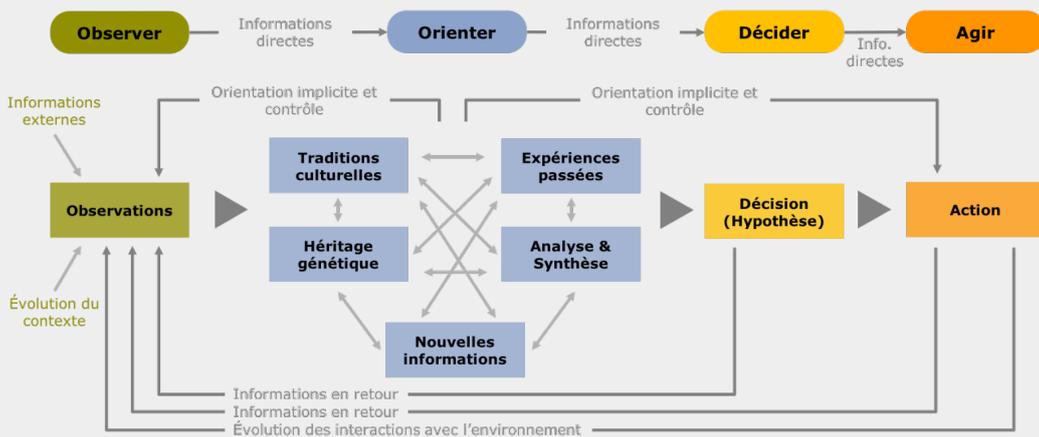


Figure 4.15: Schéma complété de la boucle OODA de Boyd

La boucle OODA semble être une meilleure candidate dans le cadre de la conception architecturale. Elle possède quelques caractéristiques plus adéquates à notre propos. Elle est une démarche que nous pourrions qualifier de située, l'interprétation (ou la perception) du monde (l'étape d'orientation) étant relative à un certain nombre de facteurs liés aux acteurs, leurs origines, leurs expériences, à la situation... La décision

dans le modèle de Boyd est imparfaite et il rajoute entre parenthèses le terme d'hypothèse. Elle est fondée sur une observation et orientation qui sont incomplètes, et incertaines. Cela nous rapproche d'une inférence abductive que nous avons mise en exergue dans la démarche de conception architecturale.

En revanche le périmètre d'application semble trop large pour s'appliquer à la granularité d'une *respiration* d'un modèle. Nous pourrions cependant trouver une analogie, probablement grossière, avec notre niveau général du processus, et ainsi interpréter ce niveau général de conception architectural par le prisme de la boucle OODA. Cela pourrait donner l'analogie suivante :

- Observe & Orient(partiellement) ↔ PRO Perception ;
- Orient(partiellement) & Decide ↔ PRO Élaboration ;
- Act ↔ ACT Évaluation .

En ce sens, la boucle OODA, surtout dans sa version complétée et détaillée qui indique les interactions et rebouclages entre les différentes activités, pourrait devenir une source d'inspiration pour la synchronisation entre les différentes activités de la conception architecturale.

Ayant évacué deux formes *classiques*, vers quelle autre forme pouvons-nous nous tourner ? Le couple et l'enchaînement divergence/convergence apparaissent comme une forme récurrente, voire peut-être même archétypale (cf. section 1.3 page 14). Nous allons la trouver dans l'ouvrage *Gamestorming* [GBM10] : cet ouvrage propose une collection d'outils et méthodes plus ou moins connues (comme le SWOT, les 5W...) qu'il revisite en proposant de les pratiquer sous forme de jeux collectifs. Dans le chapitre où les auteurs expliquent comment concevoir de tels jeux, ils utilisent un motif amélioré de divergence/convergence que nous allons reprendre à notre compte.

Encart 4.4

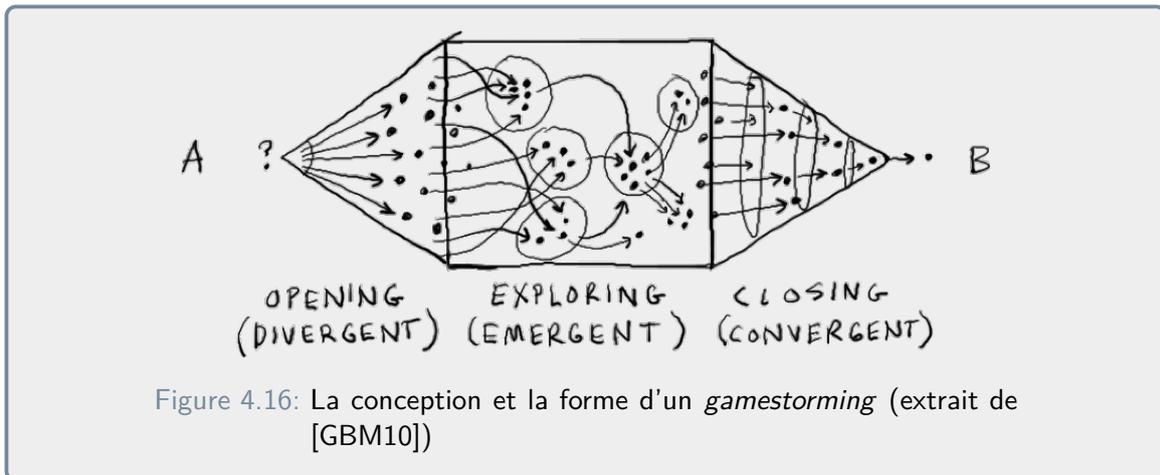
[Conception de jeux]

Pour les auteurs de *Gamestorming* [GBM10], un jeu est une manière efficace pour atteindre collectivement une cible donnée à partir d'un point de départ. La forme générale est celle, selon leurs dires, d'un crayon taillé des deux côtés. Cette forme indique 3 étapes, ou actes dans le déroulé d'un jeu.

Acte 1 : L'ouverture, acte dans lequel ouvrir son esprit, comme ouvrir les possibles doit amener le maximum d'idées. Ce temps n'est pas celui de la pensée critique, ou du scepticisme. Le maître-mot pour l'ouverture est *divergence*.

Acte 2 : L'exploration, au cours de laquelle les idées générées doivent maintenant être mises au défi. Il faut les tester, les évaluer, les combiner, les classer de manière à faire surgir la plus-value. Le maître-mot pour l'exploration est *émergence*.

Acte 3 : La fermeture, acte où les décisions sont prises (qu'est-ce que nous gardons, qu'est-ce que nous rejetons?), et les conclusions érigées. C'est à ce moment que doivent réapparaître l'esprit critique et l'esprit de synthèse. Le maître-mot pour la fermeture est *convergence*.



En s'inspirant de ce motif et le déclinant sur une respiration d'un processus élémentaire de la conception sur un modèle, cela nous donne l'enchaînement suivant :

- l'ouverture (l'inspiration) se traduit par une action d'*expansion* sur le modèle concerné ;
- l'exploration se traduit par une combinaison d'actions du genre *reformulation*, *évolution* ou *transformation*, ce que nous avons généralisé sous le terme de *modification* ;
- la fermeture (l'expiration) se traduit par une action de *contraction* sur le modèle concerné.

Cela nous donne le profil d'évolution de la surface d'un modèle, lors d'une respiration, représenté par la figure ci-après.

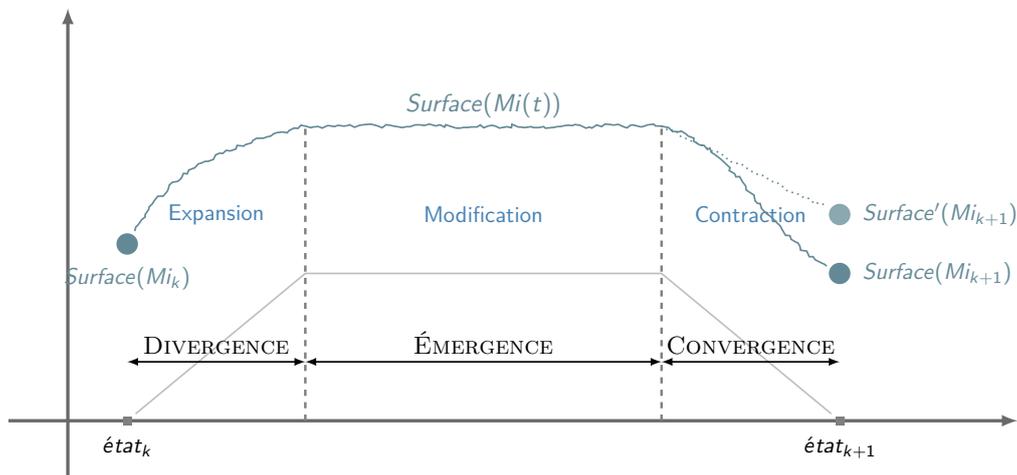


Figure 4.17: Respiration basique

Nous remarquons qu'à la suite de cette respiration, ou d'une suite de respirations formant une itération de la conception architecturale, la surface du modèle a soit augmenté, soit diminué. Cela nous permet de compléter la caractérisation de l'effet d'un processus élémentaire de la conception initié précédemment (cf. 4.3 page 140), avec les définitions suivantes.



Définition 4.10

[Effet d'un processus élémentaire de conception (2/2)]

Soit P_i un processus élémentaire de la conception agissant sur le modèle M_i , avec $i \in [1..7]$. L'effet de la transition de M_{i_k} vers $M_{i_{k+1}}$, résultat de l'exécution de ce processus P_i , sera dit :

- expansif, si et seulement si $surface(M_{i_{k+1}}) > surface(M_{i_k})$
- restrictif, si et seulement si $surface(M_{i_{k+1}}) < surface(M_{i_k})$
- stable, si et seulement si $surface(M_{i_{k+1}}) = surface(M_{i_k})$

4.2.5 Niveau particulier

Ce niveau verra la mise en œuvre de tout ou partie des processus élémentaires de la conception architecturale sans aucun ordre ou enchaînement prédéfini. En fonction de la situation et l'avancement, l'architecte décidera de privilégier tel ou tel aspect, et donc tel ou tel processus. Il peut choisir d'opérer de manière concurrente ou au contraire de sérialiser et séquencer les processus.

Contours

Nous avons vu précédemment que l'application d'un processus élémentaire sur un modèle de la conception architecturale faisait évoluer sa surface. Nous pouvons ainsi bâtir la suite finie des valeurs de la surface d'un modèle le long des itérations qui le font évoluer.



Définition 4.11

[Contour surfacique d'un modèle]

Soit M_i un modèle de la conception architecturale ($i \in [1..7]$), nous appellerons contour surfacique de ce modèle la suite $(surface(M_{i_k}))_{k \in [0..n]}$ des valeurs de sa surface.

Chaque conception donne lieu à des contours surfaciques particuliers (et ce d'ailleurs pour chaque modèle). L'accumulation et l'enregistrement de ces contours doivent permettre de dégager des profils types témoignant d'une manière particulière d'avancer en matière de conception. Nous en proposons ici un premier éventail (cf. figure 4.18 page suivante).

expansion monotone Au fur et à mesure des itérations, la surface du modèle considéré augmente. Cela devrait être un profil type pour le modèle MOD Contexte.

contraction monotone Au fur et à mesure des itérations, la surface du modèle considéré diminue. Cela devrait être un profil type pour les modèles MOD Concept ou MOD Forme.

expansion ou contraction brutale Le modèle est massivement peuplé, respectivement dépeuplé. Cela peut provenir d'un fait marquant ou d'une décision prise lors de la démarche de conception. Par exemple, une décision clé peut entraîner une contraction brutale de certains modèles par le choix d'une alternative, et donc l'abandon d'un certain nombre d'autres. Et après tout, prendre une décision clé est une manière de forcer la convergence de la conception architecturale.

rupture Il se peut qu'au cours de la conception, l'architecte soit insatisfait de l'état courant et s'aperçoive qu'il a pris un *mauvais chemin*, et décide de redémarrer sa conception, ou au moins de faire un *pas de côté*, pour prendre de nouvelles orientations.

tâtonnement L'architecte tâtonne et hésite. Le modèle tantôt s'accroît, tantôt diminue, sans suivre un chemin particulier.

latence La surface du modèle reste stable pendant un certain temps. Soit l'architecte a consacré les itérations à opérer sur d'autres modèles, soit les itérations consistent en une modification du modèle sans accroissement ou diminution de sa surface.

Cette première liste n'a aucune prétention à être exhaustive. Elle pourra être complétée par d'autres profils types. D'autre part, ces profils peuvent se combiner entre eux pour former une histoire de l'évolution du modèle, reflétant ainsi le travail de conception de l'architecte. Par exemple, pour un modèle donné, le début de la conception architecturale peut procéder par tâtonnement, puis suivre une période de latence, et enfin converger en contraction monotone vers une synthèse.

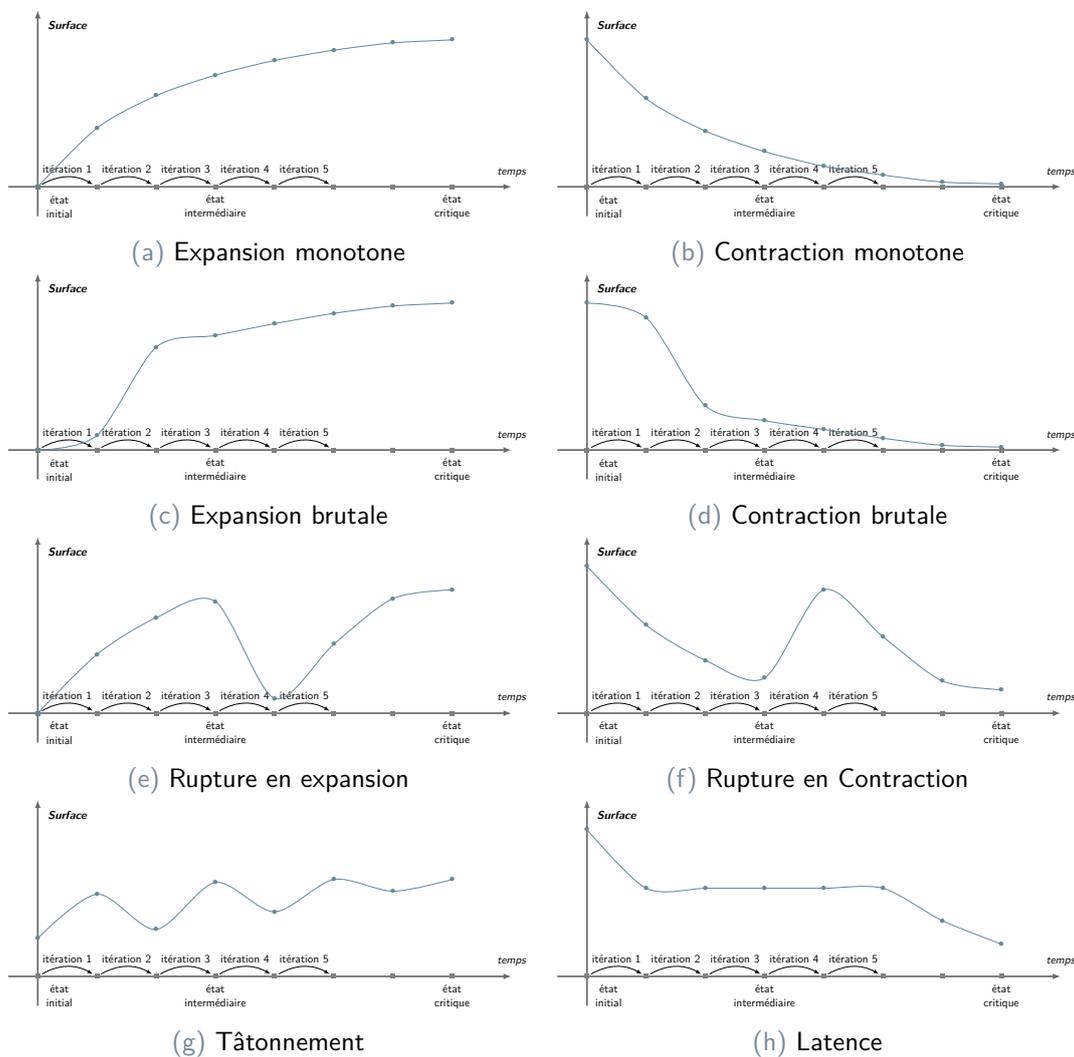


Figure 4.18: Quelques profils types de contours surfaciques de modèles

Nous pourrions faire le même raisonnement quant à la dimension d'un modèle et ainsi définir son contour dimensionnel.



Définition 4.12

[Contour dimensionnel d'un modèle]

Soit M_i un modèle de la conception architecturale ($i \in [1..7]$), nous appellerons contour dimensionnel de ce modèle la suite $(dimension(M_{i_k}))_{k \in [0..n]}$ des valeurs de ses dimensions.

Nous pouvons cependant supposer que cette grandeur évoluera peu, et que nous aurons affaire seulement à deux grandes typologies de comportement qui seraient :

- celle d'une conception dans un domaine connue, où une capitalisation du savoir-faire a pu, entre autres, donner lieu à l'établissement d'une connaissance *a priori* des dimensions des différents modèles. Dans ce cas, l'architecte prendra ses dimensions comme point de départ, procédera éventuellement à un ajustement, et puis stabilisera le nombre de dimensions tout au long de sa conception ;
- celle d'une conception dans un paysage nouveau ou dans lequel l'architecte ne pourra disposer d'une capitalisation des connaissances suffisantes. Dans ce cas de figure, il est fort probable que l'architecte procédera d'abord par tâtonnement pour fixer les dimensions requises, puis de nouveau les stabilisera.

Nous retirons de ces énoncés la synthèse suivante : le profil type du contour dimensionnel d'un modèle est une latence, éventuellement précédé d'un tâtonnement ou d'une brève expansion ou contraction.

Vers un langage descriptif de la conception

Cette évolution des modèles, dont nous pouvons dégager certains profils types, et ainsi reconnaître des motifs récurrents, s'effectue d'itération en itération. Chaque itération se traduit par une ou plusieurs respirations (cf. section 4.2.4 page 156). La respiration telle que nous l'avons dépeinte peut être vue comme un niveau élémentaire dans l'écriture du processus. Ce niveau comprend déjà un enchaînement d'actes élémentaires : *expansion* ; *modification* ; *contraction*. Nous pourrions, par analogie prétendre que ces trois termes forment le vocabulaire (les *mots*) basique d'un langage descriptif de la conception architecturale à partir duquel nous allons construire des *phrases*. Nous allons proposer dans ce qui suit une ébauche de syntaxe élémentaire.

Vocabulaire initial Nous partons des étapes élémentaires de la respiration (cf. section 4.2.4 page 156), traduites par les actions d'expansion(notée E), de modification (notée M) et contraction (notée C). E, M et C formeront notre vocabulaire initial.

Séquençage élémentaire Le principe de respiration nous amène à proposer soit une séquence qui correspond à une respiration complète, soit des séquences partielles, mais toujours en respectant l'ordre E, puis M puis C.

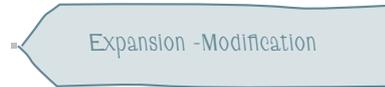
- la séquence basique complète, à savoir EMC.



- les séquences partielles :
 - la séquence M seule. Cela consiste à ne pas jouer sur la surface du modèle (aucune information n'est ajoutée, aucune enlevée), mais à mettre à jour l'information déjà contenue dans le modèle ;



- la séquence EM. L'architecte commence par ajouter et incorporer de nouvelles informations, puis il travaille sur son nouvel ensemble d'informations ;



- la séquence MC. l'architecte travaille sur son ensemble d'informations courant, puis à la fin décide d'en éliminer certaines (jugées insignifiantes, inappropriées. . .).



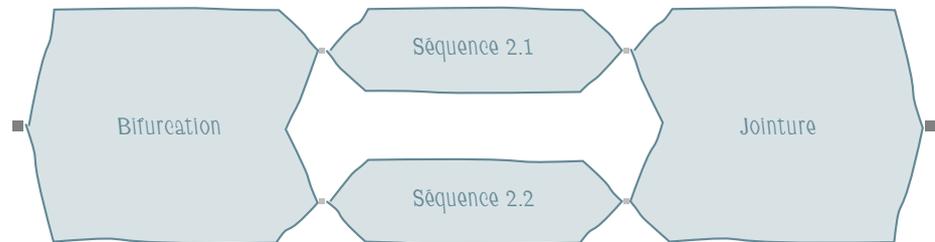
Enchaînement

Lors d'une itération, l'architecte pourra prendre plusieurs respirations, et donc enchaîner temporellement plusieurs séquences élémentaires. Voici un exemple d'un tel enchaînement.

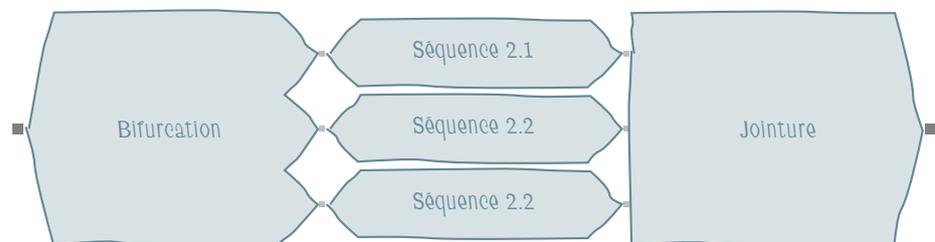


Simultanéité

L'architecte pourra partager les informations du modèle sur lequel il travaille (en utilisant par exemple les dimensions de ce modèle) et décider de travailler simultanément sur ces partitions. Cela donnera des séquences du genre :



ou

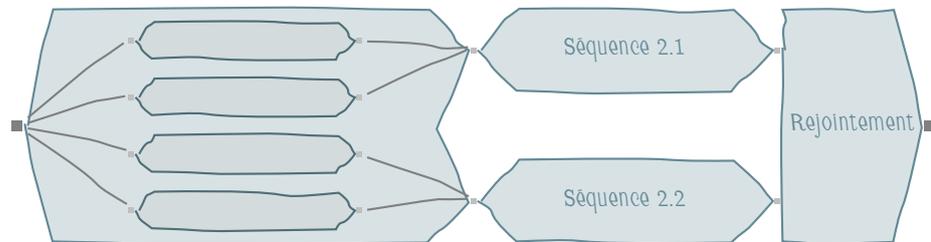


Nous remarquons un schéma classique où une concurrence suit une bifurcation et se conclut par une jointure.

Récursion

À l'intérieur même d'une respiration (totale ou partielle), l'architecte pourra vouloir enclencher des *sous-respirations*. Ces sous-respirations seront des respirations effectuées au sein d'une respiration englobante et portant sur un sous-ensemble de l'ensemble des

informations du modèle, autorisant ainsi l'architecte à exercer un mécanisme récursif dans sa conception. Voici un exemple où l'expansion d'une respiration engendre de l'information qui va servir à alimenter quatre sous-respirations, dont le résultat sera ensuite synthétisé pour passer à une étape ultérieure (ici avec deux autres respirations simultanées).



Vers une *partition polyphonique* de la conception

L'ébauche de syntaxe exprimée dans la section précédente permet d'écrire des *phrases* pour raconter le travail effectué par l'architecte pendant la conception architecturale sur un modèle donné, et ainsi de décrire temporellement ce que recouvre un processus élémentaire particulier. Le travail de conception architecturale mêle différents processus, opérant principalement sur les modèles de la conception (et davantage si nous incluons également ceux de l'espace ESP Intermédiaire) regroupant des modèles réparties sur les deux, voire trois espaces majeurs sur lesquels travaille l'architecte, ESP Perçu, ESP Envisagé et ESP Intermédiaire. Ces différentes opérations, réparties dans les différents espaces de la conception architecturale, s'effectueraient de manière parfois séquentielle, mais souvent concurrente.

Il serait possible alors de représenter cet agencement des opérations de la conception au travers d'une partition montrant le déroulé temporel et la superposition des opérations. Par analogie avec une partition musicale polyphonique, le système de retranscription comprendrait :

- différentes *portées*, chaque portée représentant l'évolution dans le temps d'un modèle à l'aide du protolangage précédemment introduit ;
- des *systèmes de portées*, un système de portée par espace, regroupant ainsi les différentes portées des modèles actifs dans cet espace, soit un système de portée pour l'espace ESP Perçu, un pour l'espace ESP Envisagé et éventuellement un autre pour regrouper les modèles de l'espace ESP Intermédiaire ;
- la *mesure* et les *barres de mesure*, à savoir la représentation temporelle des différents états intermédiaires des modèles ;
- des *figures de notes et de silences*, à savoir ici la représentation des activités de l'opération concernée à l'aide du langage précédemment introduit, et les périodes d'inactivités.

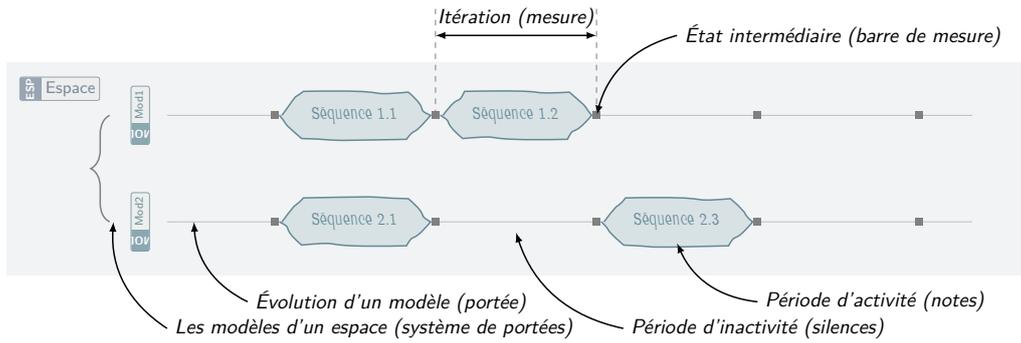


Figure 4.19: Éléments d'une partition d'une conception architecturale

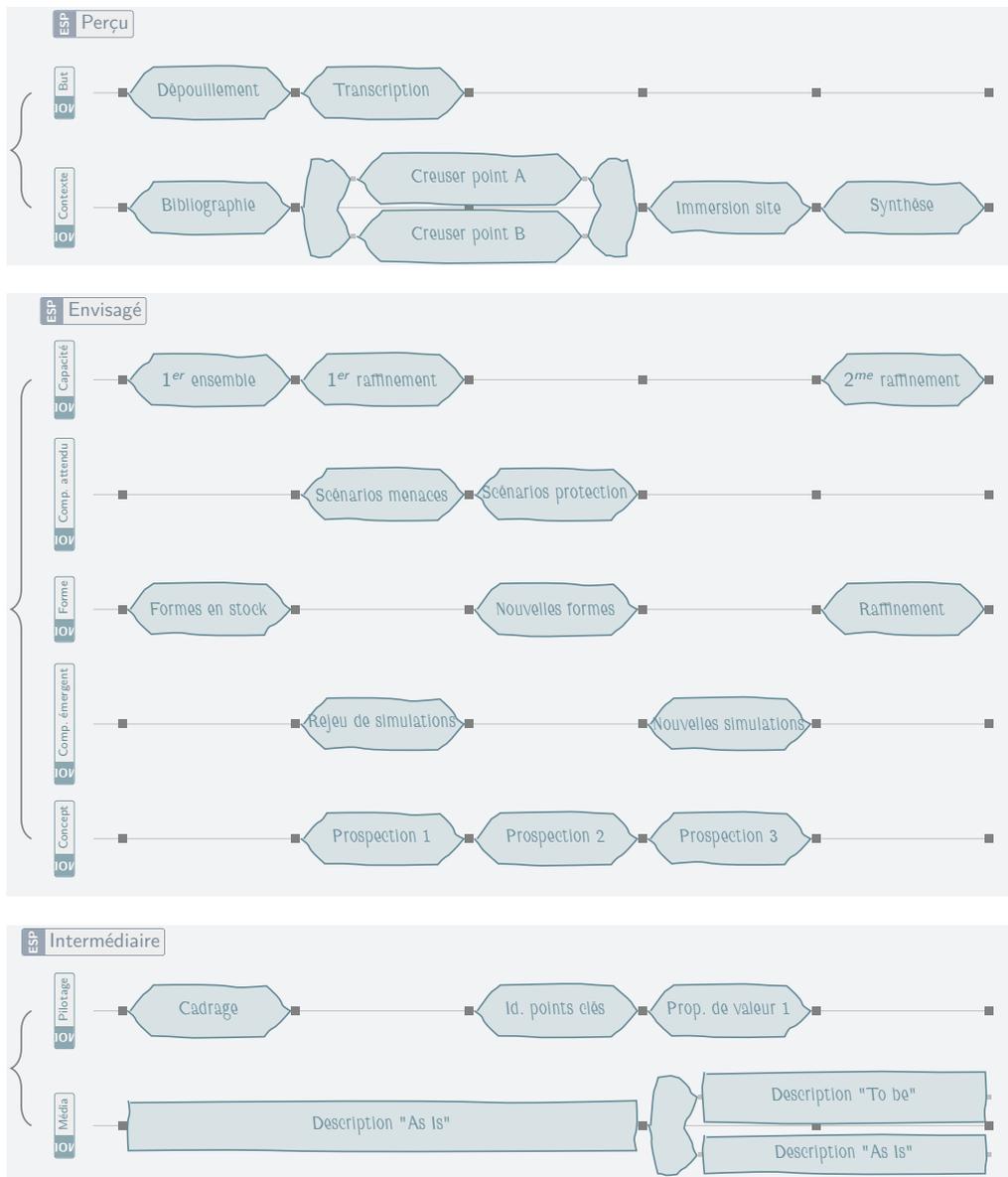


Figure 4.20: Exemple de partition d'une conception architecturale

L'art de composer une conception architecturale (ou de concevoir la conception) pourrait se structurer autour des mêmes disciplines que celui de la conception musicale polyphonique, à savoir :

rythme (et le tempo)	Trouver le bon rythme et le bon tempo pour faire les itérations : quelle durée pour un itération, quelle fréquence, même tempo tout au long de la conception architecturale, ou changement de rythme ? De même, organiser la conception en différentes étapes ou mouvements, chaque étape produisant ses résultats escomptés (décisions prises et entérinées, niveau prévu de qualité atteint. . .), célébrés lors d'un jalon.
mélodie, ou la dimension <i>horizontale</i> de la conception	Cela se traduit par des motifs ou des phrases. Nous en avons mis en avant un plus particulièrement, qui est la respiration. Celle-ci pouvant se décliner de diverses manières : en solo ou à plusieurs, et surtout choix des méthodes et techniques pour réaliser cette respiration. Deux respirations successives peuvent différer par le choix des techniques de divergence (quelle technique de créativité ou de remue-méninges), d'exploration et de convergence (quelle manière de synthétiser, quelle technique de choix, quelle rationalité, etc. ?). Le compositeur de la conception architecturale se focalisera donc sur le choix approprié de l'organisation et des techniques pour l'exécution de la <i>phrase de conception</i> , à savoir la respiration.
harmonie, ou la dimension <i>verticale</i> de la conception	La conception architecturale se répartit sur plusieurs modèles distribués dans différents espaces. Travailler sur l'ensemble des modèles en même temps et avec la même vigueur, non seulement ne serait pas très réaliste, mais tiendrait de la <i>cacophonie</i> . Bien accorder et bien sélectionner les modèles sur lesquels l'architecte opérera à un instant donné, ou lors d'une itération donnée sera le gage d'une conception <i>harmonieuse</i> .

Toujours en exploitant l'analogie musicale, il nous paraît judicieux de distinguer plusieurs postures de l'architecte planifiant et préparant son travail de conception architecturale.

l'architecte compositeur	Le travail de préparation (composition) précède complètement le travail d'exécution (la conception architecturale). L'architecte planifie (compose) le travail qu'il va (ou que son équipe) exécuter en associant mélodie, harmonie et rythme.
l'architecte arrangeur	Le travail de préparation consiste à reprendre une partition déjà établie (qui peut provenir, par exemple, de la capitalisation du savoir-faire de l'architecte, ou de l'organisation à laquelle il appartient), et à soit enrichir, soit au contraire appauvrir pour l'adapter à l'opportunité considérée. Cela est à rapprocher de l'anglicisme <i>tailoring</i> , usité en ingénierie des processus pour désigner l'adaptation d'un processus générique à la situation courante.
l'architecte harmonisateur	L'architecte part d'un motif, d'une phrase (<i>mélodique</i>), et le met en perspective. Par exemple, cela peut revenir à déterminer les dimensions des modèles impliqués, et ainsi synchroniser (<i>harmoniser</i>) le travail sur ces différentes dimensions.
l'architecte improvisateur	S'il veut improviser, c.-à-d. s'adapter au fur et à mesure des itérations, sans forcément établir une partition complète préalablement, l'architecte doit néanmoins, comme en musique, partir d'une mélodie ou d'une composition de base, et se doter de quelques règles. Sinon il témoignera peut-être d'une forme d'agilité, mais il ira à l'aveuglette sans garantie quelconque de l'obtention d'un résultat probant (surtout en ressources limitées).

Le *Design Thinking*, un cas particulier ?

À titre d'illustration, tentons de revisiter la démarche de *Design Thinking*, une démarche d'innovation et de conception de produits ou services maintenant largement répandue, en exprimant son processus sous forme d'une *partition* telle qu'introduite ici.

Encart 4.5

[*Design Thinking*]

Le *Design Thinking* est une démarche collaborative, multidisciplinaire qui émerge dans les années 80. Elle propose de dépasser la pensée analytique et un processus linéaire, pour proposer un ensemble d'*étapes*^a qui s'entrecroisent, c.-à-d. que nous ne devons pas considérer comme s'enchaînant séquentiellement, mais comme pouvant être répétée (localement ou plus globalement) et simultanée. Le *Design Thinking* s'appuie sur un certain nombre de fondements. C'est une démarche :

- centrée sur l'humain, et sur l'usage, le bénéfice qu'il pourra tirer des nouvelles solutions proposées ;
- privilégiant la collaboration en équipe multidisciplinaire ;
- favorisant les supports visuels (plutôt que le texte), le *storytelling* ;
- valorisant l'apprentissage (laissant la place à l'échec ponctuel) ;
- encourageant, voire forçant le recours aux prototypes et à l'expérimentation très tôt pour effectuer des validations avec les parties prenantes impliquées ;
- orientée solution (en tant que démarche de résolution de problèmes).

Le *Design Thinking* a popularisé un certain nombre de méthodes utiles lors d'une conception (*design methods*). Citons-en quelques-unes :

Space saturate and group *Saturer l'espace et grouper* consiste à collecter l'ensemble des observations, découvertes, interviews... et les afficher en *saturant* un espace (un mur), et en les organisant pour partager et susciter de nouveaux départs.

Personas Le recours à des *personas* force à adopter une perspective *centrée humain*, en s'identifiant à un personnage particulier et défini (il a un nom, une histoire, un caractère...), et en s'appuyant sur lui pour lui faire vivre une ou des histoires.

Stakeholder map Une *cartographie des parties prenantes* propose de représenter visuellement l'ensemble des parties prenantes impliquées, en exhibant leurs liens, leurs relations, leurs appartenances à des groupes...

Customer journey map Une *cartographie du parcours utilisateur* invite à scénariser l'expérience vécue (ou à vivre) du point de vue d'un usager bénéficiaire du service ou du produit, afin de mieux comprendre ses attentes, des doutes, ses intérêts et les opportunités d'améliorations ou de création de valeur.

Empathy map La *carte d'empathie* synthétise les observations par rapport à la ou aux personnes bénéficiaires de la conception. Elle aide à mieux comprendre les besoins et les leviers sur lesquels il est possible de jouer.

Rapid prototyping Le *prototypage rapide* utilise des moyens visuels ou des modèles physiques tirant parti de jeux de construction comme le Lego® pour rapidement proposer une manifestation des concepts avancés, et ainsi permettre une première évaluation grossière de sa viabilité et faisabilité.

Le *Design Thinking* connaît différentes déclinaisons. Les plus populaires sont certainement celle de Tim Brown qui a fondé IDEO, société entièrement consacrée à la conception (*design*), et celle de la d.School de Stanford University.

a. Nous trouvons le terme étape, pas forcément le plus approprié, dans les écrits en français. En anglais les termes employés sont suivant les publications : *mode*[Pla10], *overlapping spaces*[Bro09], et parfois *stage*

Parmi les différentes déclinaisons du *Design Thinking* en processus de conception et d'innovation, nous allons en examiner deux en particulier.

la d.School de Stanford

La d.School de Stanford a formalisé plusieurs versions du processus de *Design Thinking* et des étapes de ce processus. Nous commençons par la version de 2009, 2010 ([Pla10]) parlant de modes (*mode*), au nombre de cinq. Ces cinq modes – et non étapes – caractérisent les différents espaces, univers de travail du concepteur.

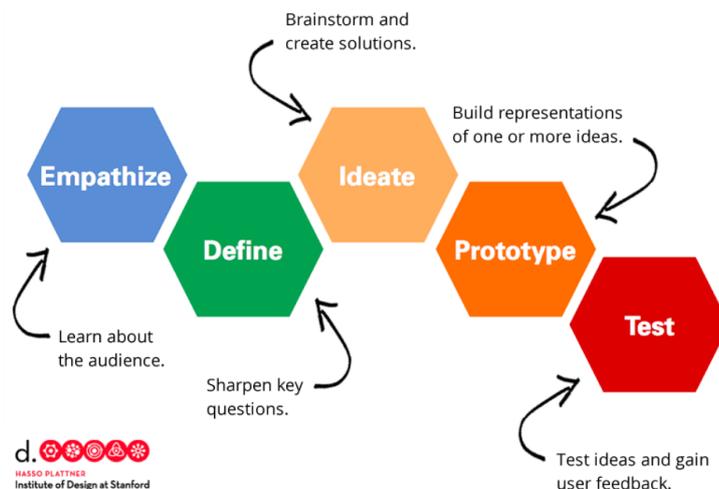


Figure 4.21: les cinq modes du *Design Thinking* selon la d.School

Empathize Le *Design Thinking* prône que dans une démarche de conception centrée sur l'humain, faire preuve d'empathie est un point clé. Pour cela, il préconise de : observer (les utilisateurs en situation réelle), interagir (en interviewant les utilisateurs), s'immerger (en faisant l'expérience de ce que vit l'utilisateur).

Define À partir des résultats du travail d'empathie, une synthèse des besoins est établie. Il s'en suit un cadrage permettant de définir l'espace de conception (*Design space*), et d'indiquer sous quel angle d'attaque (*Point of view*) nous comptons affronter le problème.

Ideate C'est une étape de divergence, de recherche d'idées. Elles se doivent d'être suffisamment nombreuses, diverses, et parfois même radicales.

Prototype Un prototype donne vie aux idées, et ce sous n'importe quelle forme appropriée (objet, visuel sur un tableau, jeu de rôle...).

Test Cela consiste à se confronter avec le réel, et particulièrement avec les utilisateurs en leur soumettant les idées de solutions.

Très souvent, l'enchaînement de ces différents modes a été représenté en double diamant (deux cycles de divergence/convergence) (cf. figure 4.22).

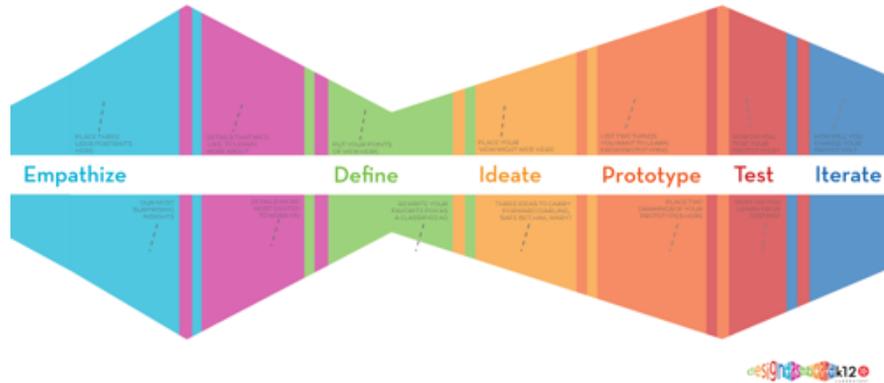
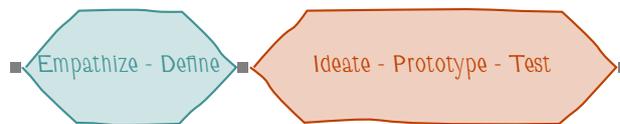
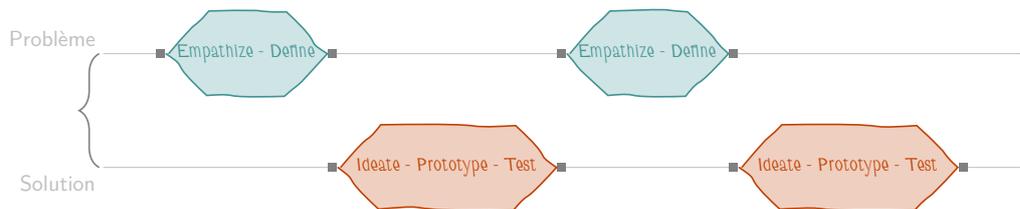


Figure 4.22: Divergence/convergence des modes du *Design Thinking* selon la d.School

Ceci nous amènerait à proposer une première réécriture naïve de ce processus de *Design Thinking* de la manière suivante :



Ou, en le réécrivant avec un système de portées, avec ici une portée pour l'espace du problème et une portée pour l'espace de la solution, qui est la partition usuelle dans l'approche *Design Thinking*.



Une révision de la d.School de son processus (cf. figure 4.24 page suivante), mettant en avant le bouclage entre les différentes étapes (ou modes) amènerait à une réécriture plus fragmentée et moins monotone. Dans ce cas, il n'y aurait pas d'histoire unique de la conception, mais bel et bien une narration individuelle.

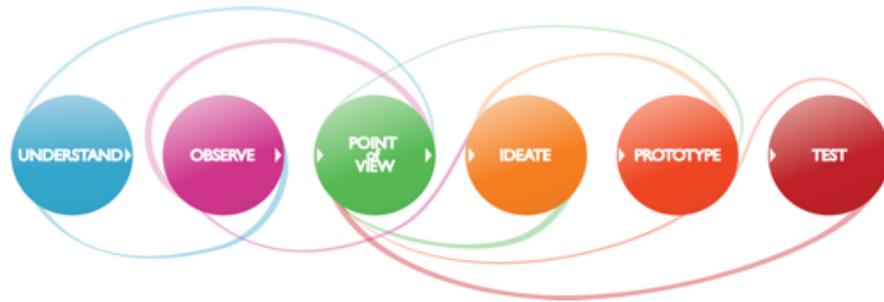


Figure 4.23: Entrelacement des modes du *Design Thinking* selon la d.School

Les 4Ws de Jeanne Liedtka

Jeanne Liedtka propose une interprétation du *Design Thinking* comme étant l'enchaînement de quatre questions à se poser ([LKB13, Lie14]).

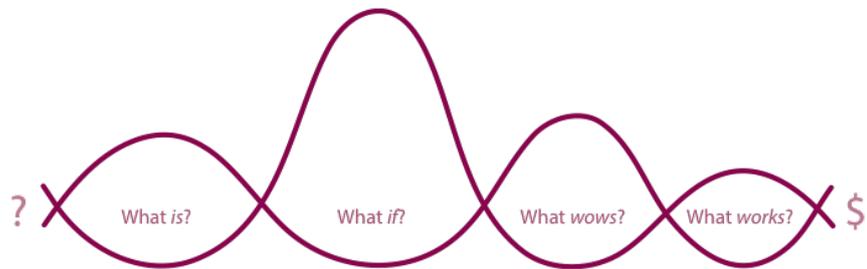


Figure 4.24: Les 4Ws du *Design Thinking* selon Jeanne Liedtka

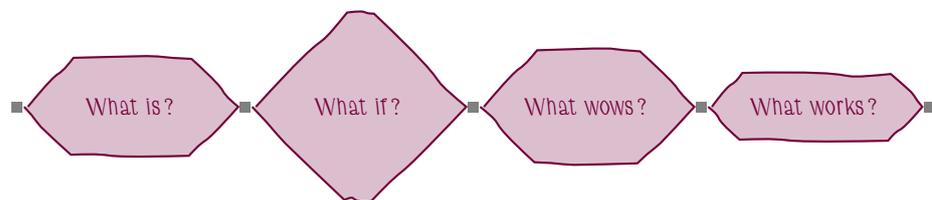
What is? Quelle perception de la réalité actuelle, quels sont les défis ?

What if? Quelles possibilités envisager ?

What wows? Quels sont les concepts, idées sur lesquels nous voulons nous focaliser qui peuvent créer de la valeur ?

What works? Une fois confronté avec la réalité, qu'est-ce qui marche ?

Cette vision du *Design Thinking* se réécrit tout naturellement dans notre représentation :



4.3 Synthèse

Le paradigme de la conception architecturale proposé s’articule autour de six espaces, dont deux spécifiques à la conception, un intermédiaire, et trois externes. Ils témoignent d’une répartition des temps inspirée de Saint Augustin.

	Monde externe (à la conception)	Monde interne (à la conception)	Monde intermédiaire
<i>Memoria</i>	ESP Infosphère		
<i>Contuitus</i>	ESP Réel, ESP Ressources	ESP Perçu	ESP Intermédiaire
<i>Expectatio</i>		ESP Envisagé	

TABLE 4.11: Synthèse des ESP Espaces

Ces ESP Espaces sont peuplés d’artéfacts qui s’agrègent en des MOD Modèles, ces MOD Modèles évoluant grâce à des PRO Processus élémentaires.

Dans l’espace...	le modèle...	... évolue grâce au processus...
ESP Perçu	MOD But MOD Contexte	PRO Désignation PRO Contextualisation
	Ils forment (par abus de langage) le modèle MOD (du) Perçu.	Ils forment (par abus de langage) le processus de PRO Perception.
ESP Envisagé	MOD Capacité MOD Comptement attendu MOD Forme MOD Comportement émergent MOD Concept	PRO Détermination PRO Clarification PRO Proposition PRO Simulation PRO Prospection
	Ils forment (par abus de langage) le modèle MOD (de l’)Envisagé.	Ils forment (par abus de langage) le processus de PRO Élaboration.
ESP Intermédiaire	MOD Média MOD Cadrage/Pilotage MOD Validation	PRO Description PRO Cadrage/Pilotage PRO Validation

TABLE 4.12: Synthèse des MOD Modèles et PRO Processus

TABLE 4.13: Carte de référence du paradigme : ESP Espace - MOD Modèle - PRO Processus

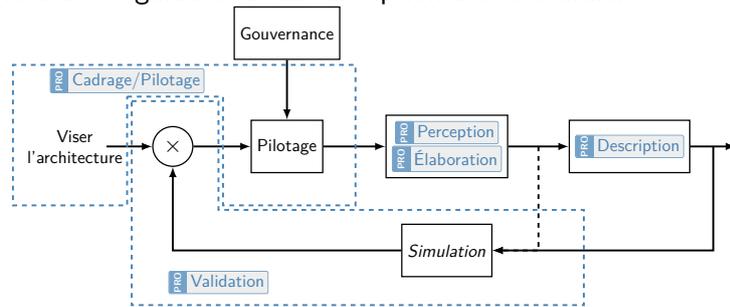
	L'espace...	est peuplé d'objets qui sont...	constituant le modèle...	évoluant grâce au processus...
Monde interne (à la conception)	ESP Perçu	des images mentales	-	-
		des artefacts (de la conception architecturale)	MOD But MOD Contexte	PRO Désignation PRO Contextualisation
	ESP Envisagé	des images mentales	-	-
		des artefacts (de la conception architecturale)	MOD Capacité	PRO Détermination
			MOD Comp. attendu	PRO Clarification
			MOD Forme	PRO Proposition
MOD Comp. émergent	PRO Simulation			
Monde intermédiaire	ESP Intermédiaire	des artefacts (de représentation)	MOD Média	PRO Description
		des artefacts (de cadrage/pilotage)	MOD Cadrage/Pilotage	PRO Cadrage/Pilotage
		des artefacts (de validation)	MOD Validation	PRO Validation
Monde externe (à la conception)	ESP Réel	tout type d'objets	-	-
	ESP Infosphère	des informations	-	-
	ESP Ressources	des ressources	-	-

Archétype

La conception architecturale des systèmes artificiels complexes est une démarche **située, holistique, itérative**, globalement **convergente**, localement **respirante, zigzagante**, intégrant les parties prenantes dans une (co)conception **visant l'architecture** (cf. section 4.2.2 page 147).

Niveau général

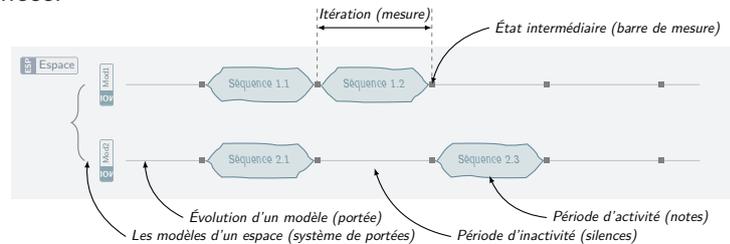
Il comprend cinq activités concourantes, deux activités opérantes, et trois servant d'intermédiaires avec les autres espaces et permettant ainsi la mise en œuvre d'une régulation de la conception architecturale.



(cf. section 4.2.3 page 150)

Ce niveau verra la mise en œuvre de tout ou partie des processus élémentaires de la conception architecturale, et des opérations qui les composent, sans aucun ordre ou enchaînement prédéfini. Cet enchaînement peut être planifié à l'avance (architecte compositeur, arrangeur ou harmonisateur) ou se construire au fur et à mesure (architecte improvisateur). Une transcription à l'aide d'une notation de la conception architecturale en une partition (par analogie avec une partition musicale) est avancée.

Niveau particulier



(cf. section 4.2.5 page 161)

Boîte à outils

Abstraction, questionnement, analyse, synthèse, jugement, décision...

Figure 4.25: Le processus de conception architecturale se décline sur 3 + 1 niveaux

Chapitre 5

Appliquer : *Safe City*

« *Safety doesn't happen by accident* »

Anonyme

Nous allons illustrer l'approche de la conception architecturale proposée dans ce manuscrit, en prenant comme opportunité ou point de départ : « rendre une ville plus sûre » (connu dans la littérature anglo-saxonne comme « Safe City »).

Ce sujet dépasse largement la simple étude de cas scolaire, et s'inscrit dans le domaine de grands systèmes, voire de système de systèmes, complexes. Nous évoquerons quelques-uns des défis que pose l'objectif d'une ville plus sûre, à commencer par définir ce que « plus sûr » veut dire. Puis nous indiquerons comment nous allons aborder cette conception : il s'agit bien plus d'illustrer les concepts précédemment introduits que de poser une méthodologie ou une démarche de conception urbaine sûre. Nous illustrerons plus particulièrement et nous focaliserons sur les processus élémentaires suivants : cadrage, désignation, contextualisation, détermination, clarification et prospection. Nous en tirerons en synthèse les apports de notre proposition pour ce type de démarche, plus particulièrement dans sa capacité à expliquer et expliciter la démarche de conception architecturale.

Sommaire

5.1	Vers une <i>ville plus sûre</i>	176
5.2	Mise en œuvre des différents PRO Processus	178
5.3	Synthèse et conclusion : démarche de conception architecturale	196

5.1 Vers une *ville plus sûre*

5.1.1 Le défi d'une *ville plus sûre*

Tout d'abord quelques mots sur la notion même de *ville plus sûre*. Récemment, de nombreuses initiatives ont fleuri sous des dénominations telles que *Smart City*, *Digital City*, ou *Intelligent City*, visant à insérer et à utiliser les technologies récentes pour s'attaquer à différentes problématiques urbaines dans un mode différent. Ces initiatives de villes, dites intelligentes, tendent à promouvoir de nouvelles et meilleures infrastructures, à déployer de plus en plus de capteurs en les interconnectant, à attirer des investissements. Mais par essence, une ville *intelligente* n'est pas une ville qui deviendra forcément plus sûre. *Intelligent* (*Smart*) favorise les nouvelles technologies et les nouvelles applications, mais cela ne reste qu'un moyen, aussi profitable qu'il soit. *Plus sûr*, en revanche, est un objectif tout à la fois exigeant et élitif.

Essayons de cerner cette notion de ville sûre. Accordons-nous que cette notion conditionne la vie des personnes et influence leurs décisions y compris quotidiennes. Chaque fois qu'elles en ont la possibilité, les personnes bougent vers des endroits (des zones urbaines) où la criminalité est réduite, les rues sont propres, la qualité de l'air est bonne, les transports sont efficaces, où elles pourront plus facilement trouver du travail, se faire soigner, s'approvisionner, etc. En couplant cette envie avec l'évolution économique, sociale, politique, culturelle, nous comprenons que la carte des zones urbaines avec leur caractère plus ou moins sûr se redessine et évolue constamment. D'autre part, le caractère *plus sûr* ne saurait se résumer à un indice de criminalité.

Pour répondre à ces attentes, la réponse *classique* a été de mettre en face de chaque catégorie de problème une organisation dédiée : la police et les forces de l'ordre face à la criminalité, un syndicat ou une société de transport pour les déplacements, des pompiers pour lutter contre les incendies et assurer les premiers secours, etc.

Nous entrevoyons se profiler un certain nombre de défis à relever en nous lançant dans la conception architecturale d'une *ville plus sûre* :

- *plus sûr* est une cible mouvante, avec son lot de nouvelles menaces et de vulnérabilités apparaissant (ou disparaissant) en permanence ;
- *plus sûr* est une propriété émergente. Il ne suffit pas d'agréger des composants sûrs pour obtenir une ville qui soit sûre. De plus, vu la complexité du système *ville*, certains effets locaux peuvent avoir des conséquences globales désastreuses (par exemple une *simple* panne de signalisation ou d'alimentation dans le réseau ferré francilien peut avoir pour conséquence de bloquer une partie de la capitale) ;
- *plus sûr* repose sur un existant et des organisations déjà préétablies, et surtout sur leur capacité à coopérer, voire collaborer entre eux ;
- *plus sûr* n'est pas un paramètre que l'on peut mesurer quantitativement et objectivement. Une grande part repose sur le ressenti des parties prenantes, et donc sur une évaluation subjective.

D'un point de vue théorique, une ville sûre tient cette qualité d'une *bonne* architecture (système ici bien sûr, et non limitée à de l'architecture au sens des édifices ou de l'urbanisation), et du contrôle (au sens de l'automatique ou de la cybernétique) approprié des interactions entre toutes les parties du système. Une cité sûre l'est par construction (*by design*), une cité encore meilleure sait comment évoluer et se recomposer dynamiquement pour s'adapter aux nouvelles menaces et vulnérabilités.

Cela montre bien qu'ici, une *bonne* conception architecturale sera déterminante pour proposer et aboutir à une *ville plus sûre*. Nous nous trouvons dans un champ qui dépasse de loin celui de la résolution de problèmes, ainsi que celui d'une démarche d'ingénierie système classique.

5.1.2 Aborder la conception architecturale d'une *ville plus sûre*

Il peut y avoir différents points de départ, ou différentes opportunités pour aborder la conception architecturale d'une *ville plus sûre*. Tout d'abord, posons que l'architecte ne travaille pas hors sol. Son travail se fait dans un cadre déterminé. Soit il est lui-même salarié de l'entreprise ou l'organisation qui porte cette démarche, et donc intervient fonctionnellement, soit il appartient à un cabinet externe et intervient contractuellement au profit de son mandant. Quelle que soit sa situation vis-à-vis du porteur de la démarche (salarié ou contractuel), il devra le faire à son profit.

L'autre distinction importante est de savoir si son travail de conception architecturale va concerner une ville en particulier, ou des villes.

Parmi les différents possibles, nous nous intéresserons au cas suivant :

- l'architecte intervient au profit d'une société privée qui cherche à s'implanter sur le marché d'une *ville plus sûre* (donc faisant face à de la concurrence) ;
- il ne s'agit pas de viser une ville ou des villes en particulier, mais de bâtir une offre globale.

Dit autrement, l'architecte ne va pas intervenir dans le cadre d'une (ou de plusieurs) réponse(s) à appel d'offres pour une (des) ville(s) en particulier. Il va contribuer à bâtir une offre pour une *ville plus sûre* sur laquelle va se positionner la société privée. Une des premières conséquences de ce choix de positionnement, fait que les interlocuteurs directs de l'architecte pour mener sa conception architecturale vont être des acteurs de la société concernée : responsable marketing, responsable stratégie, juriste, responsable financier, responsable commercial pour ne citer que les principaux.

Ce choix d'un cadre pour notre cas d'application a l'avantage d'être suffisamment vaste et complexe pour illustrer le plus largement possible notre proposition de paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes, ce qu'est assurément une *ville sûre*.

Pour autant, il ne s'agit pas ici de poser les bases d'un manuel ou un guide méthodologique sur « *comment concevoir une ville plus sûre* », mais d'illustrer le paradigme proposé au travers de certains de ces aspects. Plus particulièrement, cette illustration reposera sur les idées ou principes suivants :

- les processus les plus saillants seront illustrés en variant délibérément les approches et les manières de les mettre en œuvre pour chacun, probablement au détriment de la cohérence globale, mais au profit d'une illustration large et variée ;
- les artefacts sur lesquels travaille l'architecte sont des ébauches, des esquisses, des croquis, des essais, des amorces. En aucun cas, il n'est tenu de produire des descriptions, surtout dans cette phase amont qui est essentiellement exploratoire. Les quelques représentations de ces artefacts essaieront de traduire ce caractère incertain en utilisant des traits grossiers et des polices de caractères reflétant une écriture manuscrite. En toute rigueur, il nous aurait fallu scanner et reproduire les brouillons et notes de l'architecte ;
- dans la suite de ce chapitre, afin de mettre en lumière l'usage du paradigme proposé, les termes relevant de ce paradigme et des notions introduites seront mis en exergue de la manière suivante : *clarification* est une notion du paradigme.

Nous chercherons à montrer que ce paradigme offre un cadre pour affronter la complexité dans une démarche de conception architecturale et qu'il permet de verbaliser le travail de l'architecte.

5.2 Mise en œuvre des différents **PRO** Processus

5.2.1 **PRO** Cadrage/Pilotage

Le but visé sera d'aboutir à une orientation, c.-à-d. des principes, un positionnement, des idées fortes permettant d'avoir une offre compétitive, et non pas à la conception d'un système, ou même sa description prescriptive. La *forme* de celui-ci, dans cette phase, restera à l'état de simple épure ou ébauche. Le *concept* global sera privilégié.

Cela va se traduire par la mise en avant de certains *processus* au détriment d'autres, d'autant plus que dans ces phases exploratoires amont, les équipes disposent souvent de ressources limitées. Cette sélection en matière de focalisation de l'effort à fournir aboutit au *cadrage* suivant :

- concernant la **PRO** Perception de l'opportunité, les processus de **PRO** Désignation et de **PRO** Contextualisation seront tous déployés (à ce stade, la capacité à *bien* percevoir l'opportunité est primordiale) ;
- concernant l'**PRO** Élaboration de l'opportunité, les processus de **PRO** Détermination, **PRO** Clarification et **PRO** Prospection seront privilégiés afin de favoriser l'émergence d'un concept, d'une orientation. Les processus de **PRO** Proposition et **PRO** Simulation seront quant à eux négligés. Ils seront certainement mis pleinement en œuvre plus tard. Probablement lorsque, une fois l'orientation approuvée et la décision de poursuivre entérinée par les donneurs d'ordre, l'architecte reprendra ses travaux. Ceux-là devraient alors aboutir à des plans prescriptifs pour les différentes fonctions aval (ingénierie, production, opérations, maintenance...) où les processus de **PRO** Proposition et **PRO** Simulation prendront toute leur place ;
- le **PRO** Cadrage/Pilotage de la conception architecturale sera quant à lui essentiel, c'est ce que nous sommes d'ailleurs en train de faire valoir ;
- la **PRO** Description pourra être réduite à la production d'un document d'orientation. Nous ne nous y appesantirons pas, préférant éclairer les processus de **PRO** Perception et d'**PRO** Élaboration ;
- nous ne décrirons pas davantage sa mise en œuvre, mais la **PRO** Validation quant à elle sera d'importance. Elle visera à obtenir le retour et l'approbation des parties prenantes impliquées.

Pour aboutir à une orientation, un concept, le cadrage se fera autour d'un certain nombre de *décisions clés* qui auront été partagées et approuvées par les parties prenantes impliquées dans cette phase d'orientation (pour rappel : responsable marketing, responsable stratégie, juriste, responsable financier, responsable commercial)

Voici le résultat de l'identification de quelques *décisions clés*, sans aucun ordre précis :

- Quelle portée géographique de l'offre (locale, régionale, nationale, continentale, mondiale) ?¹
- Quel type de villes (nouvelles ou anciennes), quelle taille ?
- Un système par ville, plusieurs systèmes par ville, un système pour plusieurs villes ?
- Quelle stratégie pour d'aborder le marché ?²
- Quelles alliances, quels partenariats ?³
- Quel positionnement par rapport aux initiatives de *villes intelligentes (smart cities)* ?
- Quel(s) objectif(s) de *plus sûr* viser ?⁴
- Quel mode de financement ?

- Quelle(s) source(s) de revenus attendre ?
- Quelle(s) grande(s) orientation(s) technologique(s) ?
- Délivrer un produit ou un service opéré ?

En plus de ces *décisions clés*, l'architecte s'appliquera à identifier et exhiber les *points critiques*. Sa pertinence à les identifier et puis à y apporter des réponses convaincantes sera une démonstration indéniable de la plus-value de son travail de conception architecturale et donc de sa contribution dans le projet global.

Afin d'éclairer cet aspect, nous en citerons deux qui nous semblent particulièrement saillants.

planification versus autonomie *plus sûr* étant une propriété émergente (cf. section 5.1.1 page 176), elle devrait être obtenue en *architecturant* correctement la ville, en planifiant son évolution, de manière descendante (du niveau le plus haut – le système *ville* dans son intégralité – en irriguant les niveaux inférieurs – les différentes organisations, responsabilités...). Or aujourd'hui, sauf sur certains aspects particuliers (par exemple, en France, le PLU – Plan Local d'Urbanisme – est un document stratégique qui définit les orientations d'aménagement et d'urbanisme à l'échelle du territoire communal ou d'un groupement de communes), les différents acteurs de la ville possèdent une forme d'autonomie qui dans certains cas peuvent contredire l'objectif global de *plus sûr*.

la malédiction des frontières administratives Sans surprises, la plupart des menaces font fi des différentes frontières administratives. Par exemple, un criminel en fuite ne va s'arrêter à la limite d'un arrondissement ou d'une commune. D'autre part, la traque par la police durant sa cavale pourrait bénéficier plus largement de la vidéo surveillance, si cette dernière pouvait avoir accès, temporairement, à d'autres réseaux⁵. Comment inciter les différents acteurs à partager leurs ressources et à agir de concert dans leur manière de s'équiper ?

Remarquons que ces deux points critiques résultent chacun d'une contradiction avérée.

Les *respirations* (ou groupe de *respirations*) qui marquent le travail itératif de l'architecte devront permettre d'instruire les différentes *décisions clés* et avancer sur les *points critiques*. Dans une opportunité comme celle-ci où l'architecte et les parties prenantes impliquées abordent un domaine peu connu, voire inconnu, l'ordre causal des décisions n'est pas fixé à l'avance. Soit un travail sur ces *décisions clés* et *points critiques*, en étudiant en particulier leurs interdépendances, leurs ramifications et leurs impacts sur la solution envisagée, permet de les ordonnancer, et dans ce cas cet ordre servira à rythmer la conception architecturale, soit ils sont pris tous de front, et au fur et à mesure de l'avancement de la conception architecturale, les décisions sont prises et les points critiques résolus de manière opportune. Une autre option consisterait à mettre en place un rétroplanning avec des dates au plus tard de prises de décisions en fonction des contraintes posées par les différentes parties prenantes.

Dans tous les cas, il est fort à parier que ces décisions seront prises dans l'incertain. Le travail de l'architecte dans cette phase vise à diminuer cet incertain tant que faire se peut, et à tenter de minimiser, ou tout du moins expliciter, la prise de risque induite par ces décisions.

1. Non seulement cela détermine le positionnement, mais cela peut entraîner certaines contraintes. Suivant les pays, les régions... différentes réglementations peuvent s'appliquer, et ainsi empêcher une solution universelle. De même certaines restrictions d'usage de brevets, d'exportation peuvent mettre à mal l'usage ou le recours à certaines technologies clés.

2. Par exemple en se référant au *Delta Model* de A. Hax [HS06], stratégie produit (*best product*), stratégie de plate-forme et de verrouillage (*system lock-in*) ou stratégie de satisfaction client (*total customer solutions*) ?

3. Le mandant se positionne-t-il tout seul ou aborde-t-il l'opportunité en essayant de nouer des alliances ou des partenariats. Si oui comment se positionne-t-il dans cette alliance : maître d'œuvre, intégrateur, opérateur, partenaire... Quel partage du risque, des investissements... ?

4. Dit autrement, quelle est la définition d'une *ville plus sûre* pour le mandant ?

5. Sur Paris, la brigade criminelle peut, en plus de son propre réseau – dit PVPP, pour Plan de Videoprotection Pour Paris – se connecter sur le réseau de la RATP et du RER.

Ce processus de **cadrage** sera évidemment particulièrement actif au démarrage, mais pour autant pas forcément inactif après. Il est probable qu'au démarrage, faute de connaissances du domaine, l'architecte et les autres parties prenantes impliquées ne soient pas en mesure d'identifier exhaustivement les décisions clés et les points critiques. Ils en découvriront d'autres au fur et à mesure de leur cheminement. Cela se traduira par une expansion continue, forte au départ, plus douce après des artéfacts du modèle de **MOD Cadrage/Pilotage**.

La figure ci-après utilisant la notation introduite dans le chapitre précédent (cf. section 4.2.5 page 161) condense et illustre ce cheminement possible du processus de **cadrage** opéré par l'architecte.

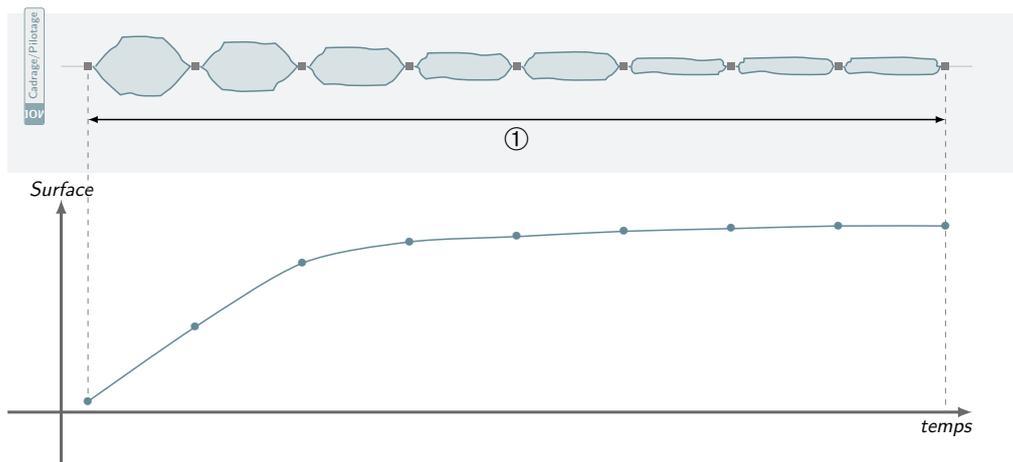


Figure 5.1: Le processus de **PRO Cadrage/Pilotage** dans la conception architecturale d'une *ville plus sûre*

① **Expansion** : Identification des décisions clés et des points critiques.

Dimensions identifiées et définies dans ce processus de **PRO Cadrage/Pilotage** :

- décision clé ;
 - point critique.
-

5.2.2 **PRO Désignation**

L'architecte se retrouve ici face à la difficulté de définir ce que veut dire une *ville plus sûre*. Son caractère polysémique ne permet certainement pas d'établir une définition catégorique. Peut-être parviendra-t-il à la fin de sa démarche à capturer l'essence de la proposition ou de l'orientation en une phrase vers laquelle les différentes parties prenantes auront convergé en un aphorisme qui tiendra lieu de slogan ou de motto. Le processus de **désignation** démarrera vraisemblablement par des **respirations** globalement expansives (oscillant entre l'**expansion monotone** et **tâtonnement**). Fort de son interrogation de l'infosphère (bibliographie, butinage sur la Toile...), et des contacts avec le monde **réel** (interview, immersion dans des environnements urbains...) l'architecte peuplera dans un premier temps sa **perception** du **but** (**MOD But**) de divers artéfacts sans forcément dégager de lien ou de corrélations entre eux. À partir de cette meilleure connaissance de ce qu'est une ville, l'architecte pourra cerner le but non pas en cherchant à définir ce que

veut dire ville sûre, mais en explicitant ce qui peut être ou devenir plus sûr. Une première fragmentation de l'objectif de *ville plus sûre* et synthèse (*contraction*) pourrait alors se traduire par la collection d'objectifs suivante (qui sont autant d'*artéfacts* du modèle de *but*) :

- sécurité des personnes ;
- santé des personnes ;
- approvisionnement en eau sûr ;
- fourniture énergétique sûre ;
- approvisionnement en nourriture sûr ;
- mobilité (transports compris) sûre ;
- habitations sûres ;
- économie sûre ;
- infrastructures urbaines sûres ;
- shopping sûr ;
- bureaux et lieux de travail sûrs ;
- loisirs et culture sûrs ;
- environnement sonore sûr ;
- air non pollué et sain ;
- traitement des eaux usées et des déchets sûr ;

ce à quoi nous pouvons ajouter suivant le contexte géographique des villes considérées :

- sécurité fluviale ;
- sécurité côtière ;
- etc.

Muni de ce tas d'objectifs potentiels, l'architecte peut chercher à les caractériser. En reprenant et s'inspirant de la partition 3P que nous avons posée pour caractériser la nature des éléments dans la forme d'un système (cf. section 3.1.3 page 83), une ville après tout est un système, l'architecte peut poser les *attributs* suivants :

- concerne les personnes ;
- concerne les fonctions (ou les activités) ;
- concerne le tangible.

Ce à quoi il peut rajouter l'attribut :

- concerne l'environnement.

Il va ainsi procéder à un *classement* de ces *objectifs* comme le montre le croquis ci-après (cf. figure 5.2 page suivante). Il décide de surligner en vert les objectifs se rapportant à l'environnement.



Figure 5.2: Classement des objectifs d'une ville plus sûre

Que faire avec tous ces **objectifs**. Chercher à tous les couvrir relèvera sans doute de la gageure. L'architecte ne travaille pas hors sol, et ne saurait viser un idéal abstrait et déconnecté de son environnement. Sa démarche s'inscrit dans un cadre particulier : son entreprise ou le client qui l'a mandaté pour effectuer cette conception d'une *ville plus sûre*. Il aura à cœur de mettre en regard les hypothèses d'objectifs (à ce stade ses artefacts relèvent de la supposition) avec le contexte particulier de l'entreprise mandante. S'en suit donc une (ou plusieurs) respirations, où la partie divergente (l'**expansion**) consiste à incorporer la connaissance des atouts (*assets*) de l'entreprise ou du client (le portefeuille de produits et services offerts, les feuilles de route technologiques et stratégiques, l'image de marque. . .) et puis à les mettre en regard des objectifs pour faire émerger des concordances ou des opportunités (**évolution** des buts), afin de converger vers les buts les plus opportuns, les plus profitables à viser (**contraction**). Cette ou ces respirations seront certainement conclues et sanctionnées par la prise d'une **décision clé**, à savoir sur quel(s) objectif(s) le mandant de cette conception architecturale va finalement se positionner.

La figure ci-après utilisant la notation introduite dans le chapitre précédent (cf. section 4.2.5 page 161) condense et illustre un cheminement possible du processus de **désignation** opéré par l'architecte.

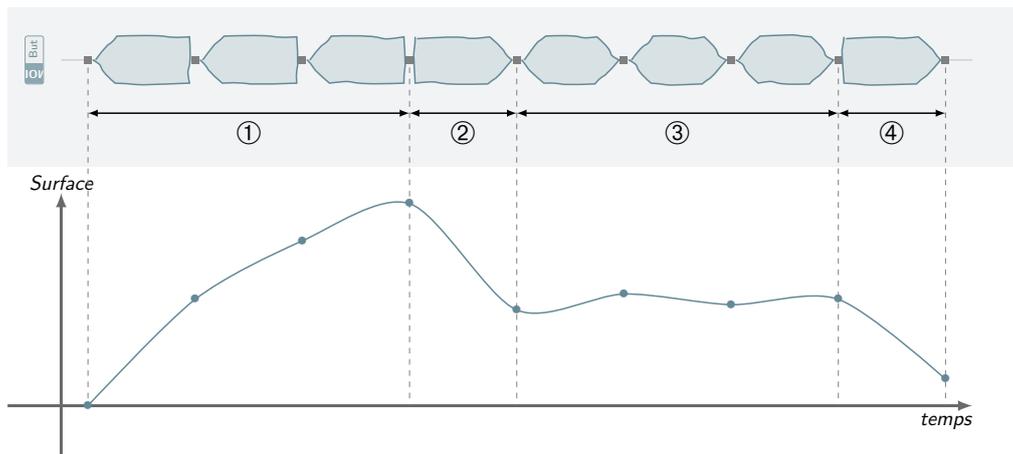


Figure 5.3: Le processus de **PRO Désignation** dans la conception architecturale d'une ville plus sûre

- ① **Expansion** : Recherche externe en largeur.
- ② **Contraction** : Première synthèse.
- ③ **Tâtonnement** : Confrontation avec les atouts internes.
- ④ **Contraction** : Choix d'un positionnement.

Dimensions identifiées et définies dans ce processus de **PRO Désignation** :

- personnes ;
- tangible ;
- activités ;
- environnement.

Cet enchaînement (recherche externe en largeur, première synthèse, confrontation avec les atouts internes, positionnement) est potentiellement un schéma récurrent (un *pattern*) du processus de **PRO Désignation** dans le cas où le but est à construire, et non à interpréter par rapport à un objectif externe fourni (cas par exemple d'une réponse à appel d'offres).

5.2.3 **PRO Contextualisation**

Cette opération consiste pour l'architecte à construire, c.-à-d. conceptualiser, un **contexte** plausible dans lequel les autres **artéfacts** qu'il va élaborer vont prendre sens. Il va pour cela acquérir toute sorte d'informations en provenance de l'**infosphère**, percevoir certains aspects du **réel** au travers d'expériences sensibles, et interpréter tout cela.

Encore une fois cette opération ne peut être complètement objective et absolue. La personnalité de l'architecte, sa sensibilité, vont influencer sur la manière de faire cette contextualisation. Le résultat dépendra de son état courant (physique, comme psychologique), de ses émotions, de sa culture, de ses connaissances préalables. Sa posture vis-à-vis du monde qui l'entoure jouera : lira-t-il ce monde ou tentera-t-il de le ré-écrire ? *A minima*, il devra chercher à le rationaliser (tant que faire se peut), et à partager sa compréhension. Cependant, n'oublions pas que si la compréhension d'un contexte peut être préservée et partagée, elle va néanmoins s'éroder avec le temps.

L'entourage de l'architecte, au sens de l'ensemble des personnes qui interagissent ou qui influent avec le projet architectural concerné, est une manifestation du caractère situé de la conception architecturale. Cela devrait se traduire, comme composantes du **MOD Contexte**, par autant d'*artéfacts* qu'il y a de parties prenantes identifiées. Ces *artéfacts* pourront être colorés d'un *attribut* particulier permettant de les classer, posant ainsi une des *dimensions* possibles du contexte, celle des parties prenantes. Une cartographie des parties prenantes peut être un support de représentation à cette *dimension*.

Dans le cas qui nous intéresse, les citoyens, les touristes, les services publics, les compagnies privées et les autorités (locales ou non) attendent tous une *ville plus sûre*. Ils sont à la fois des acteurs et des bénéficiaires. L'énumération qui suit, portant uniquement sur les organisations, confirme la cardinalité importante des parties prenantes à identifier et à connaître : polices (municipale, d'état, fédérale, judiciaire, d'intervention...), autres forces de sécurité (garde-côtes, services de sécurité privés, milices...), pompiers, urgences/premiers secours, diverses administrations municipales, services publics (ramassage d'ordure et gestion des déchets, entretien de la voirie, épuration et distribution d'eau...), institutions liées à l'éducation (école, collèges, universités...), institutions liées à la santé (hôpitaux, cliniques, cabinets médicaux, maisons de retraite...), services de transports (bus, métro, trains, taxis...), achats/courses (négoce, centre commerciaux...), loisirs/culture (cinémas, théâtres, centres culturels, installations sportives, bibliothèques, médiathèques, centres de loisirs, parcs d'attractions...), services de communication, approvisionnement (énergie, eau, denrées...), institutions financières (banques, assurances...), accueil et hospitalité (hôtels, hébergements, centre de congrès...), etc.

Un autre aspect du *contexte* tiendra dans l'imprégnation et la connaissance du contexte interne à son entreprise ou à son mandant, et en particulier dans l'identification et la connaissance de ses atouts (portefeuille de produits, de brevets, de technologies clés maîtrisées, ainsi que les plans et orientations futures).

La notion de *contexte* englobe également différentes autres *dimensions*. Chacune de ces *dimensions* correspond à un point de vue, une coupe opérée par l'architecte dans sa manière de percevoir et d'interpréter le monde.

Citons à titre d'exemple quelques-unes des *dimensions* possibles dans l'appréhension du contexte : sociale, politique, légale, technologique, environnementale, historique, géographique, culturelle... Il revient à l'architecte de déterminer conjonctuellement et opportunément les *dimensions* de son **MOD Contexte**. Il peut pour cela s'appuyer sur des cadres prédéfinis. L'encart ci-après en mentionne quelques-uns.

Encart 5.1

[Cadres pestel, dorese, dotmlpfi]

L'analyse PESTEL (Politique, Économique, Sociologique, Technologique, Environnemental, Légal) est un modèle permettant d'identifier l'influence (positive ou négative) de facteurs macro-environnementaux via une analyse large spectre de l'opportunité. Six catégories sont distinguées :

Politiques contexte politique avec ses orientations (livre blanc par exemple), décisions pouvant se transformer en directives, décrets ou lois, relations internationales, stabilité gouvernementale, politique fiscale, etc.

Économiques compétiteurs, marché dans lequel s'insère l'opportunité, différents acteurs économiques, règles économiques, sources de financement et sources de revenus, taux d'intérêt, contraintes d'offset, contraintes de retour géographique, cycle économique, politique monétaire, inflation, etc.

Social et sociétal	environnement social (différents organismes, syndicats), code du travail, modalités d'engagement (contrat de travail, bénévolat. . .), habitudes de travail, habitudes de consommation, niveau d'éducation, démographie, mouvements sociaux, mobilité sociale, etc.
Technologiques	investissements sur la technologie, brevets, technologies émergentes, technologies obsolètes, ruptures technologiques, vitesse de transfert technologique, taux d'obsolescence, etc.
Environnemental	protection de l'environnement, retraitement des déchets, consommation d'énergie, approvisionnement en matières premières, etc.
Légaux	lois sur les monopoles, droit du travail, législation sur la santé, normes de sécurité, contraintes douanières, contraintes d'import/export, etc.

Le modèle DORESE est issu du monde militaire français et analyse les diverses composantes permettant de mettre en œuvre une capacité ou un système :

- Doctrine : comment utiliser le système,
- Organisation : comment organiser les utilisateurs et autres parties prenantes,
- Ressources humaines : quels sont les effectifs et compétences nécessaires pour mettre en œuvre un système,
- Équipements : de quoi est constitué le système, et de quoi a-t-il éventuellement besoin pour être utilisé,
- Soutien : comment organiser la vie du système pendant son utilisation,
- Entraînement : comment former les utilisateurs et autres parties prenantes.

Le modèle DOTMLPFI est la version américaine, et est utilisé au-delà du domaine militaire. Les axes d'analyse sont en anglais : *Doctrine, Organization, Training, Materiel, Leadership and education, Personnel, Facilities, Interoperability*.

Chaque ville, qu'elle soit ancienne ou nouvelle, est une opportunité singulière. C'est un système, voire un système de systèmes, sociotechnique complexe comprenant des personnes jouant des rôles différents, des infrastructures, des ressources et des organisations (publiques ou privées). Une analyse de type PESTEL prend ici tout son sens et nous nous rendons facilement compte que les dimensions politique, économique, sociétale et sociale, environnementale et légale, ont ici toute leur importance. Mais cela ne suffit pas ; il faut compléter cette perception du contexte par d'autres dimensions comme :

dimension géographique	La ville est-elle en bord de mer, à l'intérieur des terres ; proche ou non d'une frontière territoriale ? Quelle est sa partition géographique en quartier, éventuellement en fonction des nationalités – <i>Chinatown, Japantown, Indiantown</i> . . . –. S'inscrit-elle dans un ensemble territorial plus grand – communauté d'agglomération, province. . . – ?
dimension historique	Cette dimension complète la dimension géographique. Suivant les enseignements de Fernand Braudel, cela permet de comprendre « <i>pourquoi la ville est comme cela aujourd'hui</i> ». Par exemple, nous devons certains grands boulevards parisiens aux travaux dirigés par le préfet Haussmann sous le Second Empire mettant en œuvre ainsi une politique volontaire d'urbanisme.

dimension climatique	La ville est-elle sujette aux fortes pluies ou à la mousson, est-elle exposée aux aléas climatiques... ?
dimension culturelle, voire morale	Quelle est la relation des citoyens et de la nation à la liberté? Y a-t-il propension à l'individualisme ou au contraire au collectif? Quelle relation les citoyens ont-ils avec l'ordre et la discipline? etc.

Mais considérer toutes ces dimensions, aussi complet que cela puisse paraître, suffira-t-il pour aborder le côté *plus sûr* d'une ville. L'architecte ne pourra s'exempter de procéder à une analyse des menaces et des vulnérabilités. Persuadé que ces menaces et vulnérabilités évoluent dans le temps, il devra prendre ces résultats pour non définitifs. Il lui sera nécessaire de remettre en cause régulièrement son analyse, et sans doute de prévoir de mettre en œuvre une activité continue de maintien (ou d'anticipation) de cette connaissance.

Une première passe de découverte des menaces potentielles pourrait aboutir à une énumération telle que celle-ci :

- crime (offense à la personne, agression violente, agression sexuelle, atteinte à la propriété, atteinte à l'ordre public, atteinte à l'état...);
- cybercriminalité (espionnage, déni de services, destruction d'installation, corruption des données, effacement, piratage...);
- crime organisé;
- trafic de drogue;
- attentat terroriste (à l'arme blanche, à l'arme à feu, à l'explosif, à l'arme chimique, à l'arme bactériologique, à l'arme radiologique...);
- météo (froid extrême, canicule, inondation, tempête, tornade, orages...);
- catastrophe naturelle (tremblement de terrain, glissement de terrain, tsunamis...);
- pollution (sonore, de l'air, de l'eau...);
- accident ou panne (routier, de train, explosion, chimique, nucléaire, de distribution du gaz, de distribution de l'eau, de distribution de l'énergie, du traitement des déchets ou des eaux usées, du réseau de communication, incendie, bâtiment...);
- service inefficace (mauvaise collecte des déchets, mauvais éclairage des voies de circulation, mauvais services communaux, mauvais services administratifs, mauvais services médicaux, mauvais services de transport en commun, mauvais services éducatifs, mauvais services sportifs, mauvais services culturels, mauvais services de divertissement...);
- absence de gouvernance;
- chômage;
- absence de solidarité, individualisme, agressivité;
- maladie, stress;
- congestion du trafic (embouteillage, train, métro...);
- grève;
- mauvaise réputation;
- environnement oppressant (effet ghetto, crise du logement...);
- extraterrestre (ou superhéros, ou...).

La dernière menace pourrait apparaître comme farfelue et susciter l'ironie ou la moquerie. Pour autant elle souligne un aspect essentiel d'une analyse des menaces, à savoir l'impossibilité d'atteindre une identification exhaustive de celles-ci. Le côté décalé de la menace extraterrestre (ou de superhéros ou que sais-je) est là pour rappeler qu'il y a toujours des menaces imprévues que nous ne pourrions pas identifier, et que rendre un système *plus sûr* c'est aussi savoir faire face à l'impondérable.

Et la même activité d'analyse des vulnérabilités potentielles pourrait aboutir à une première liste identifiant non pas les types de vulnérabilités, mais les éléments constitutifs d'une ville qui pourraient exposer des vulnérabilités.

Personnes :

- citoyen adulte ;
- enfant ;
- touriste ;
- migrant ;
- personnes officielles, VIP.

Organisation et institutions :

- police municipale ;
- police d'État (ou fédérale) ;
- gardes-côtes ;
- pompiers ;
- administration ;
- institutions éducatives ;
- services d'urgence ;
- service de santé ;
- services de transport ;
- commerces ;
- associations ;
- services culturels, sportifs, de loisirs ;
- entreprises et industries ;
- fournisseurs de services ;
- fournisseurs d'énergie.

Infrastructure :

- réseaux de communication ouverts ;
- réseaux de communication sécurisés ;
- infrastructure urbaine (éclairage, banc public, abri bus...) ;
- infrastructure routière ;
- infrastructure ferroviaire ;
- réseaux de distribution de l'eau ;
- traitement des eaux ;
- réseaux de distribution de l'énergie ;
- centrale électrique ;
- réseaux de distribution du gaz ;
- parking ;
- centres culturels, musée, théâtres, cinémas, parc... ;
- bâtiments publics ;
- logement occupé ;
- logement inoccupé ;
- écoles ;
- banques ;
- bureaux et bâtiments opérationnels ;
- ports, aéroports.

Si une bonne partie de cette perception peut se faire par absorption de connaissances (au travers de livres, de vidéo, d'interviews...), il ne faudra pas négliger l'immersion directe en *allant sur le terrain pour se rendre compte*.

Le cheminement de l'architecte dans son processus de **contextualisation** sera certainement de tout d'abord absorber un maximum d'informations, puis de les interpréter, les enrichir, les représenter pour enfin s'en servir de base de référence. La figure ci-après utilisant la notation introduite dans le chapitre précédent (cf. section 4.2.5 page 161) condense et illustre un cheminement possible du processus de **contextualisation** opéré par l'architecte.

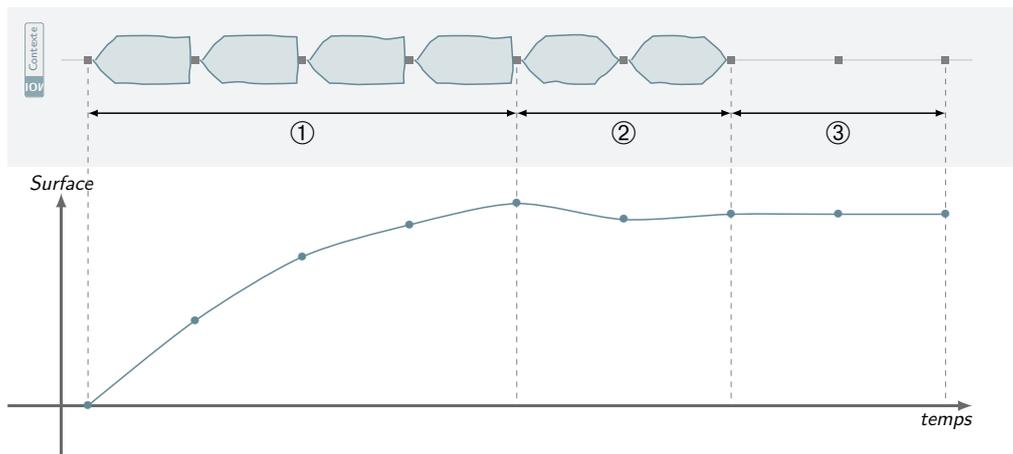


Figure 5.4: Le processus de **PRO Contextualisation** dans la conception architecturale d'une *ville plus sûre*

- ① **Expansion** : Collecte, et interprétation.
- ② **Tâtonnement** : Structuration et représentation.
- ③ **Latence** : Base de référence et partage.

Dimensions identifiées et définies dans ce processus de **PRO Contextualisation** :

- les six dimensions de PESTEL ;
- géographique ;
- historique ;
- climatique ;
- culturelle ;
- morale ;
- partie prenantes ;
- menaces ;
- vulnérabilité des personnes ;
- vulnérabilité des organisations ;
- vulnérabilité des infrastructures.

Comme précédemment, cet enchaînement (collecte, interprétation, structuration, représentation et partage) est potentiellement un schéma récurrent (un *pattern*) du processus de **PRO Contextualisation**. Notons également que ce processus de **PRO Contextualisation** démarre avec la détermination des **dimensions** à considérer, donc par une **expansion en dimension**.

5.2.4 **PRO Détermination**

L'architecte peut se retrouver ici dans une situation de relative perplexité. Quelles **capacités** considérer ? Où et comment les trouver ?

Devant l'ampleur de la tâche à accomplir, il peut alors essayer de repartir d'un existant. La thématique d'une *ville plus sûre* étant nouvelle, il y a peu de chance qu'une base d'analyse capacitaire soit établie, disponible et partagée. L'architecte peut alors se retourner vers des thématiques proches pour en faire sa source d'inspiration.

En particulier, il peut se pencher sur les travaux du ministère de la Sécurité intérieure des États-Unis (*Department of Homeland Security*). Suite aux attentats du 11 septembre, à l'attaque à l'anthrax, aux ravages de l'ouragan Katrina et autres menaces pouvant se profiler, le président des États-Unis lance en décembre 2003 une initiative (*Homeland Security Presidential Directive (HSPD)-8 [The03]*) pour établir une politique nationale afin de renforcer les capacités des États-Unis à prévenir, se protéger, répondre et se rétablir en cas d'attaques terroristes, de catastrophes majeures ou autres situations d'urgence. Les résultats de ces travaux, embarquant des acteurs publics à différents niveaux de responsabilités (fédéral, étatique, local, territorial, tribal) ainsi que des acteurs privés et des organisations non gouvernementales a donné lieu à des directives sur la préparation de l'état (*National Preparedness Guidelines*), traduisant le « *quoi* » (Qu'est-ce que la nation doit faire pour être prête). L'approche adoptée a été une approche d'analyse et de planification capacitaire. Ainsi nous retrouvons parmi les artefacts produits par ces travaux une liste de capacités (*Target Capabilities List (TCL) [oHS07, UDoHS09, oHS13]*), et des scénarios (*National Planning Scenarios [oHS10]*).

En regardant les résultats documentaires disponibles de ces travaux par le prisme de notre paradigme, nous pouvons prétendre qu'il s'agit de *descriptions* qui témoignent et partagent les résultats d'un travail de *détermination* et de *clarification*, sous-tendus par un travail de *désignation* (interprétation de la directive HSPD-8) et de *contextualisation*.

À partir de ce nouveau point départ, l'architecte dispose d'une base de 37 capacités [oHS07], et il peut maintenant procéder à une sélection et adaptation des capacités au contexte d'une *ville plus sûre*. Cette première passe peut aboutir à une liste telle que ci-après.

Capacités communes :

- communications (interopérables) ;
- renseignements, partage d'information et dissémination ;
- coordination opérationnelle ;
- informations et alertes au public.

Capacités liées à la prévention :

- détection CBRNE⁶ ;
- contre-terrorisme ;
- application de la loi ;
- médecine légale, identification et attribution ;
- collecte d'information, reconnaissance et alerte ;
- production et analyse du renseignement.

Capacités liées à la protection :

- contrôle d'accès et vérification d'identité ;

- protection sanitaire de la population ;
- surveillance de la criminalité et de la délinquance ;
- protection des infrastructures critiques ;
- cybersécurité ;
- surveillance épidémiologique et investigation ;
- sécurité et défense de la nourriture.

Capacités liées à la mitigation :

- préparation et implication des communautés ;
- réduction long terme des vulnérabilités ;
- planification ;
- gestion des risques ;
- identification des menaces et des risques.

Capacités liées à la réponse :

- intervention des forces de sécurité (police) ;
- évacuation de la population et s'abriter sur place ;

6. Chimique, Bactériologique, Radiologique, Nucléaire et des Explosifs.

- première intervention aux défaillances des infrastructures urbaines ;
- logistique et distribution des biens de première nécessité ;
- réponse d'urgence à la sûreté et sécurité publique ;
- triage et traitement préhospitalier d'urgence ;
- protection et réponse de santé aux risques environnementaux ;
- traitement des victimes (et des scènes de crime) ;
- opérations de réponse aux dispositifs explosifs (*EDRO*⁷) ;
- support aux opérations de lutte incendies ;
- isolation et quarantaine ;
- soins à grande échelle (abri, alimentation et autres services vitaux) ;
- prophylaxie de masse ;
- gestion et distribution des médicaments ;
- augmentation rapide de la capacité de soins ;
- sécurité et santé des équipes d'intervention ;
- recherche et sauvetage (*SAR*⁸) ;
- évaluation de la situation ;
- gestion des volontaires et des donations.

Capacités liées au rétablissement :

- remise en service des services primordiaux (eau potable, traitement des déchets, télécommunications...) ;
- évaluation des dommages structureaux des infrastructures.

Cette première étape va néanmoins nécessiter quelques itérations successives, pour s'affiner et incorporer d'autres capacités potentielles. Partir des capacités dédiées à la sécurité intérieure avait l'avantage d'éviter le syndrome de la page blanche, en revanche cela ne couvre pas tous les aspects d'une *ville plus sûre*. L'architecte va donc tâtonner et accroître légèrement sa base de capacités potentielles jusqu'à arriver à un stade de stabilité où il juge satisfaisant son ensemble de capacités.

Si ce travail de couverture amène à un état de satisfaction, il est irréaliste de penser adresser l'intégralité des capacités, surtout de front. Comme dans le cas des objectifs, va devoir s'opérer une sélection. Cette sélection s'effectuera en regard des *objectifs* à atteindre (le résultat de la *désignation*) et des atouts du mandant (une partie du *contexte* construit au travers de la *contextualisation*). On voit poindre ici une interdépendance entre les processus, et le recours au *zigzag* entre ces différents processus.

Une fois cette sélection opérée, l'architecte pourra consolider sa base de *capacités*, en les structurant. Cette structuration pourra porter sur deux aspects :

- un aspect d'interdépendance (telle *capacité* requiert tout ou partie d'une autre *capacité* pour pouvoir s'exercer) ;
- un aspect d'ordonnement temporel montrant les différents incréments capacitaires échelonnés dans le temps (tel bout de *capacité* mis en œuvre, puis tel autre bout de telle autre *capacité*, puis...).

La figure ci-après utilisant la notation introduite dans le chapitre précédent (cf. section 4.2.5 page 161) condense et illustre un cheminement possible du processus de *détermination* opéré par l'architecte.

7. Explosive Device Response Operations.

8. Search And Rescue.

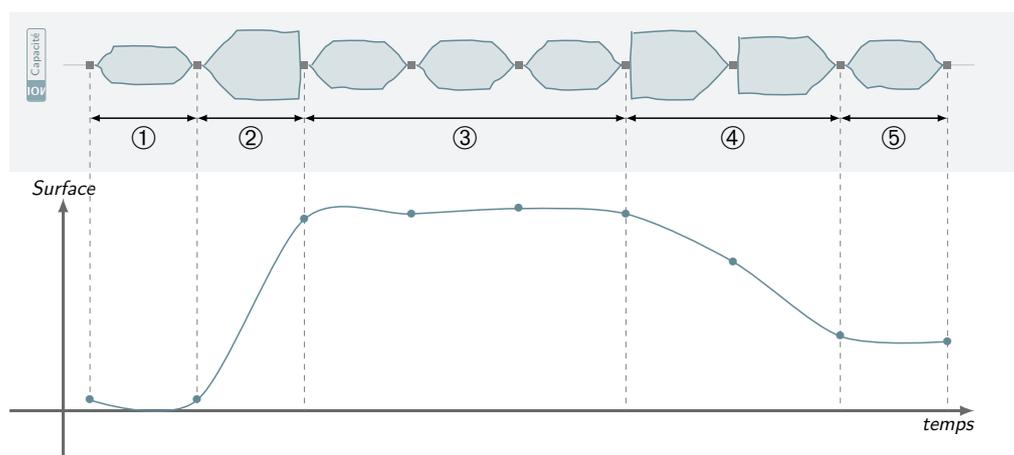


Figure 5.5: Le processus de **PRO Détermination** dans la conception architecturale d'une ville plus sûre

- ① **Tâtonnement** : Hésitation.
- ② **Expansion brutale** : Adoption d'une base de départ, la liste des capacités cibles (*Target Capabilities List – TCL*) du ministère de la sécurité intérieure des États-Unis.
- ③ **Tâtonnement** : Travail d'adaptation et de consolidation sur les capacités de la TCL, identification et ajout de capacités manquantes.
- ④ **Contraction** : Confrontation avec les **objectifs** et les atouts du mandant (partie du **contexte**) et sélection .
- ⑤ **Tâtonnement** : Consolidation de la liste des capacités retenues.

Dimensions identifiées et définies dans ce processus de **PRO Détermination** :

- commun ;
- prévention ;
- protection ;
- mitigation ;
- réponse ;
- rétablissement.

5.2.5 **PRO Clarification**

Le processus de **clarification** vient ici en complément et en soutien des processus de **détermination** et de **prospection**. À ce stade de réflexion, l'architecte privilégiera l'histoire ou le scénario pour éclairer la manière dont les **capacités** visées sont mises en œuvre au travers des différents **concepts** auxquels il peut penser. Il traduira ainsi des saynètes, des historiettes au fur et à mesure de son avancement en scénarimages, diagrammes de séquence, cas d'utilisation, etc. Nous donnons dans la suite deux exemples.

1^{er} exemple de **clarification**

Nous nous plaçons dans le cas suivant.

concept envisagé Le concept que cherche à creuser et à illustrer l'architecte est celui qui consiste à développer et opérer une plate-forme de services à valeur ajoutée indépendante. Ici, indépendante doit se comprendre comme n'étant pas la propriété exclusive d'un service ou d'une organisation publics, mais un service, public ou privé, auquel toute institution ou tout organisme qui contribue à la sécurité dans la ville peut avoir accès, moyennant des droits d'accès, du besoin d'en connaître, etc.

capacité visée Toutes les capacités visées peuvent ainsi bénéficier de ce type de plate-forme, et il faudrait faire pour chacune, un ou plusieurs scénarios illustratifs exhibant comment elles peuvent bénéficier de ces services et ainsi créer de la valeur ajoutée en matière de sécurité. Nous avons choisi ici de montrer un scénario simple sur une capacité, celle d'application de la loi.

Le scénario ci-après (cf. figure 5.6), illustre pour la conduite d'une investigation par une police municipale (une des activités de l'application de la loi) un tel recours à ce genre de services. Les forces de l'ordre ayant à leur disposition un enregistrement d'une caméra de surveillance dont ils ont extrait un visage inconnu, interrogent le service pour savoir qui est cette personne.

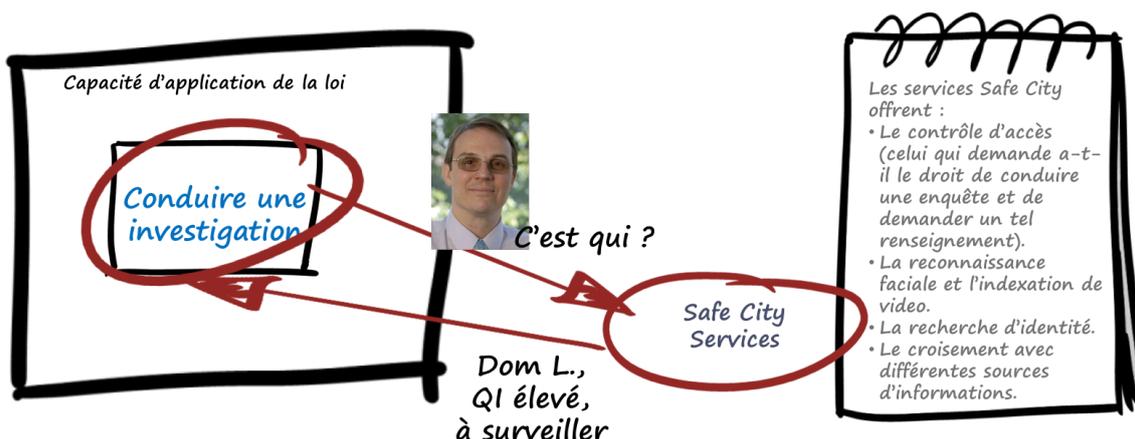


Figure 5.6: Scénario de renforcement d'une capacité

2^{ème} exemple de *clarification*

Nous nous plaçons dans le cas suivant.

concept envisagé Nous reprenons le concept précédent, celui d'une plate-forme de service. Dans le cas précédent nous avons illustré le recours à ce service par un organisme pour son propre bénéfice. Un des défis pointés pour atteindre une *ville plus sûre* était la capacité à faire collaborer les différents organismes jusqu'alors souvent trop cloisonnés. Nous augmentons le concept initial en renforçant cette plate-forme de services afin qu'elle soit un intermédiaire de confiance (*trusted broker*), ce qui ne sera sans conséquence sur sa propre infrastructure et sa propre (cyber)sécurité, afin de favoriser la coopération et encourager le décloisonnement.

capacité visée L'histoire illustre la capacité de protection d'un site critique qui n'est pas sous la responsabilité de la police municipale ou des forces de l'ordre, et la coopération avec d'autres capacités, ici celle d'application de la loi.

Le scénario ci-après (cf. figure 5.7), illustre une coopération entre deux organismes, en charge de deux capacités différentes, au travers de la plate-forme de services. Le scénario laisse d'ailleurs présager que la création d'information résultante de la coopération entre les deux services peut être plus largement partagée et diffusée.

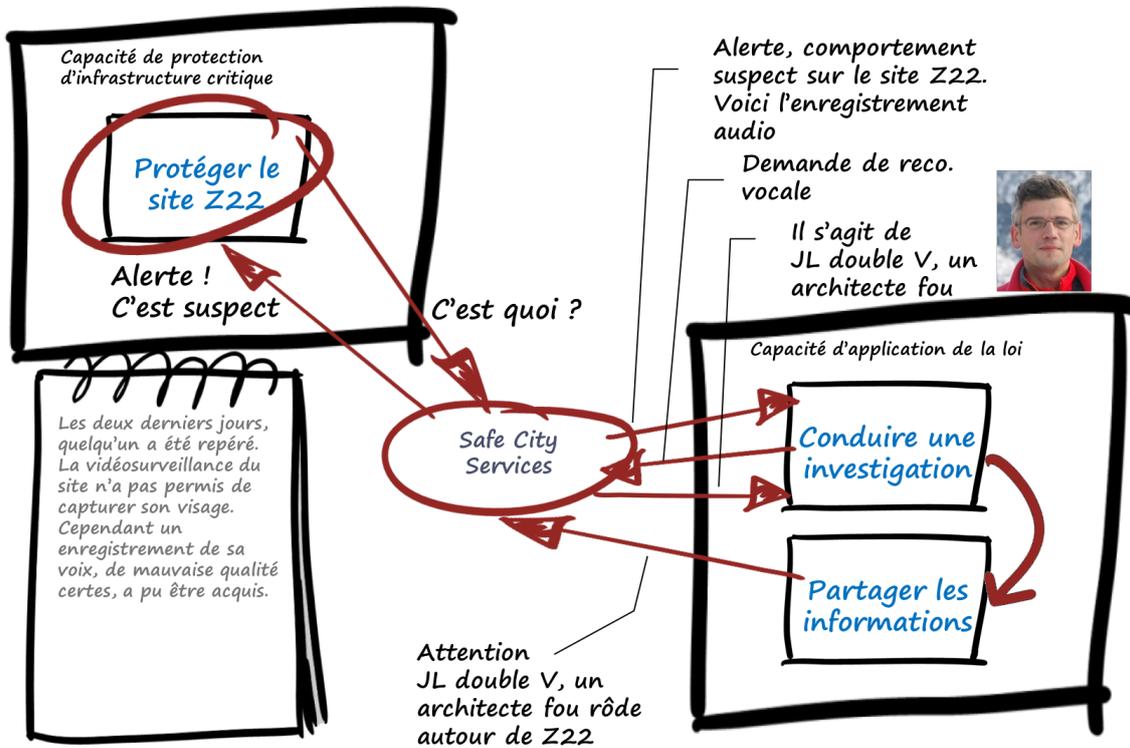


Figure 5.7: Scénario de coopération entre diverses capacités

Nous pourrions multiplier à loisir les exemples de *clarifications* effectuées par l'architecte. En fait, il s'agit pour lui d'une activité support quasi permanente qui le conforte dans ses processus de *détermination* ou de *prospection*. Il est fort à parier que cette activité sera expansive au début (l'architecte explore diverses possibilités de *comportements*) puis restrictive (l'architecte sélectionne les *comportements* pertinents et validés ou approuvés par les parties prenantes), avant d'être stable lorsqu'il dispose d'une base de *comportements* pertinente.

La figure ci-après, utilisant la notation introduite dans le chapitre précédent (cf. section 4.2.5 page 161), condense et illustre un cheminement possible du processus de *clarification* opéré par l'architecte.

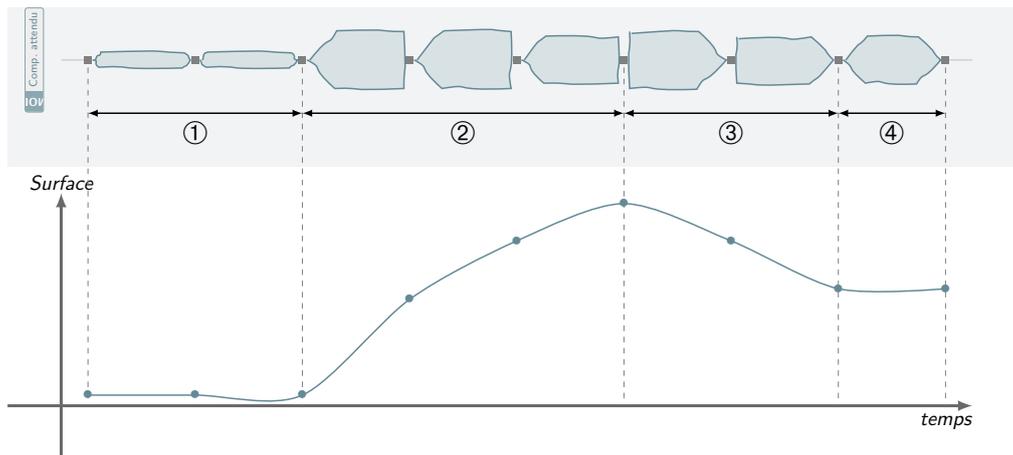


Figure 5.8: Le processus de **PRO Clarification** dans la conception architecturale d'une ville plus sûre

- ① **Latence** : Concentration sur les **objectifs** et les **capacités**.
- ② **Expansion** : Exploration, recherche de **comportements** illustratifs adéquats.
- ③ **Contraction** : Sélection et adoption des plus représentatifs.
- ④ **Tâtonnement** : Éventuellement consolidation.

5.2.6 **PRO Prospection**

L'architecte va chercher à produire le plus possible de **concepts**, candidats potentiels pour façonner la solution architecturale. Pour cela, il met en œuvre des techniques de créativité, mobilise sa connaissance, son savoir-faire et son imagination. Il peut entre autres avoir recours à des analogies, des métaphores, des comparaisons qui peuvent l'aider dans son travail.

Il serait ici difficile d'énumérer tous les concepts possibles que l'architecte peut imaginer, ou même inventorier toutes les sources d'inspirations, ou toutes les techniques de créativité permettant de générer différents concepts. Nous nous contenterons d'illustrer cette génération de concepts par deux exemples, deux générations d'idées.

1^{er} exemple de **prospection**

Ce premier exemple propose de générer un concept par une référence historique. L'architecte peut se laisser influencer par le travail d'Eugène-François Vidocq (1775..1857), bagnard repent et père de la police judiciaire. À un moment de l'histoire de France où la criminalité tend à se transférer des zones rurales vers les zones urbaines (début 19^{ème} siècle), Vidocq va changer de méthodes et imposer un nouveau paradigme. Parmi les différents enseignements, l'architecte retient celui-ci. Les criminels de l'époque opèrent de manière isolée et ne peuvent compter que sur leur propre *sagesse* (ils n'ont pas accès à une connaissance commune et partagée). À côté de cela, la police judiciaire qu'il va mettre en place, va créer et entretenir des bases de crimes, ce qui accroîtra considérablement l'expérience et la sagesse de la police. Ce passage à l'échelle de la police parisienne permettra de renverser le rapport de force. Là où individuellement les criminels continuent de commettre les mêmes fautes, la police peut maintenant mieux les attraper, ayant un coup d'avance sur

eux. De nos jours, les criminels avancent de manière organisée. Ces organisations peuvent démultiplier leurs tactiques grâce à un accès au monde ouvert et à la technologie. Rendre la ville plus sûre (d'un point de vue de la criminalité) serait sans doute d'appliquer le concept de Vidocq, remis au goût du jour.

Comment dès lors restaurer cette balance que Vidocq avait mise en place. Une idée serait de bénéficier de tous les moyens d'observations pour enregistrer indéfiniment la ville au travers de la forêt de capteurs en tout genre (dont ceux de vidéosurveillance) qu'elle déploie ou va déployer, et s'appuyer sur des techniques d'analyse, de fusion, de reconnaissance, de prédiction et sur tout ce qu'ouvrent aujourd'hui les techniques liées à l'intelligence artificielle pour reconnaître les tactiques des criminels, voire prédire les futurs. Nous obtiendrons sans doute, ce que l'on pourrait nommer un *effet Vidocq*.

2^{ème} exemple de *prospection*

Par analogie avec la virtualisation des réseaux, des systèmes d'exploitation, des serveurs. . . l'architecte peut penser étendre ce principe à la virtualisation des ressources. Par exemple, au lieu de partager des caméras de vidéosurveillance physique entre divers organismes, ce qui peut poser des soucis en matière de souveraineté de la ressource par l'organisme propriétaire et responsable, il peut penser à créer un réseau virtuel de caméras. Ces caméras virtuelles s'appuieraient sur des ressources physiques, mais de manière transparente, et surtout sans jamais offenser l'organisme propriétaire de la ressource physique (respect des droits d'accès, du contrôle, de la priorité d'accès à la ressource, du besoin d'en connaître. . .). Ce concept de virtualisation permettrait à la fois de mettre en œuvre de manière respectueuse une mutualisation des ressources, et d'offrir un terreau fertile à la coopération entre agences ou institutions.

Le premier exemple est bien sûr lié à la *capacité* « *Application de la loi* » (cf. section 5.2.4 page 188) et contribue potentiellement à tous les *buts*, la criminalité pouvant toucher n'importe quel aspect de la ville (cf. section 5.2.2 page 180). Il va ainsi jouer un rôle d'alternative à considérer par rapport à la *décision clé* « *Quel(s) objectif(s) de plus sûr viser ?* » (cf. section 5.2.1 page 178).

Le deuxième exemple est une alternative pour répondre (partiellement !) au point critique « *la malédiction des frontières administratives* » (cf. section 5.2.1 page 178)

La génération d'un nombre conséquent de *concepts* ou d'alternatives différents, puis la sélection idoine des *concepts* les plus adéquats pour affronter les *décisions clés* et les *points critiques* vont permettre de façonner une orientation de la solution architecturale. L'architecte va globalement procéder d'abord par une *expansion* (peuplement avec divers concepts), puis une *contraction* (sélection des concepts adéquats). Cela peut se faire en une seule grande respiration, ou en plusieurs.

Les figures ci-après, utilisant la notation introduite dans le chapitre précédent (cf. section 4.2.5 page 161), condensent et illustrent deux cheminements possibles du processus de *prospection* opéré par l'architecte. Le premier illustrerait un processus où l'ensemble des concepts seraient générés au départ (*expansion monotone*), puis au fur à mesure certains seraient éliminés pour converger vers l'ensemble des concepts retenus en final (*contraction monotone*). Le deuxième représenterait une convergence globale entrecoupée de divergences et convergence locales, ce qui ne serait pas sans rappeler la convergence contrôlée de Pugh (cf. section 1.3.2 page 36).

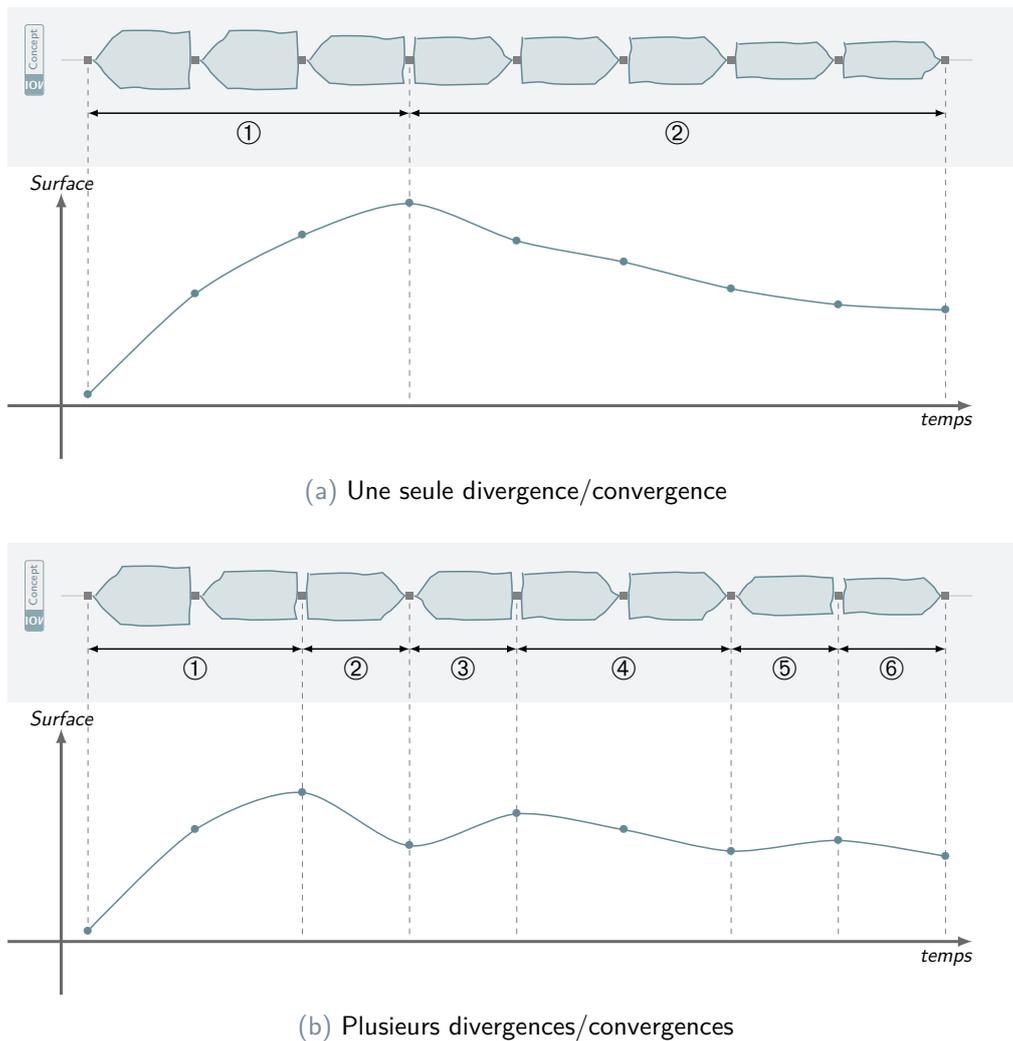


Figure 5.9: Le processus de **PRO Prospection** dans la conception architecturale d'une *ville plus sûre*

- ① (et ③,⑤) **Expansion** : Divergence, de nouveaux concepts sont imaginés et ajoutés.
- ② (et ④,⑥) **Contraction** : Convergence, des concepts sont éliminés pour ne garder que les plus adéquats ou opportuns.

5.3 Synthèse et conclusion : démarche de conception architecturale

La démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes que nous avons proposée (cf. section 4.2 page 146) s'articulait sur quatre niveaux. Oublions le niveau *boîte à outils*, que nous n'avons pas développé dans le chapitre précédent, et conséquemment pas illustré ici. Examinons les trois autres niveaux dans notre cas d'illustration de la conception architecturale dans une phase amont (d'orientation) d'une *ville plus sûre*.

Niveau particulier Chaque processus décrit précédemment suit un cheminement propre. Nous avons cherché à diversifier ces cheminements à des fins de richesse de l'illustration, sans pour autant que ces cheminements soient définitifs et irrévocables. Nous avons écrit une

histoire particulière de la conception architecturale d'une *ville plus sûre*, mais bien d'autres histoires auraient pu être racontées. En revanche, les notions introduites et le proto-langage spécifié (cf. section 4.2.5 page 163) nous ont permis de verbaliser ces cheminements particuliers.

Niveau général

Nous retrouvons bien ici la conjonction, l'enchevêtrement de différents processus. Pour rappel :

- le processus de **PRO Perception** est mis en œuvre dans son intégralité : **PRO Désignation** (cf. section 5.2.2 page 180) et **PRO Contextualisation** (cf. section 5.2.3 page 183) ;
- le processus d'**PRO Élaboration** est illustré (et probablement déployé) partiellement dans cette phase. Seuls les processus de **PRO Détermination** (cf. section 5.2.4 page 188), **PRO Clarification** (cf. section 5.2.5 page 191) et **PRO Prospection** (cf. section 5.2.6 page 194) sont mis en avant, les processus de **PRO Proposition** et de **PRO Simulation** sont pour l'instant laissés pour compte) ;
- le processus de **PRO Cadrage/Pilotage** est décrit (cf. section 5.2.1 page 178), il tient l'ensemble ;
- les processus de **PRO Description** et de **PRO Validation** ne sont pas illustrés, mais sont utilisés à bon escient (cf. section 5.2.1 page 178).

Niveau archétypal

Rappelons que ce niveau archétypal stipule que « *La conception architecturale des systèmes artificiels complexes est une démarche **située, holistique, itérative, globalement convergente, localement respirante, zigzagante, intégrant les parties prenantes dans une (co)conception visant l'architecture.*** » (cf. section 4.2.2 page 147). Revoyons ces différentes caractéristiques sur l'illustration par notre cas d'étude d'une *ville plus sûre*.

- **situé** : Le mandant de ce projet ne part pas de rien, et possède un certains nombres d'atouts qui le situe (ses propres collaborateurs ou salariés, ses brevets, ses compétences technologiques, son portefeuille de produits et de services. . .). Et l'architecte lui-même est situé. Par exemple, le concept généré à partir de l'histoire de Vidocq montre que notre architecte a une culture occidentale, et est imprégné de l'histoire de France.
- **holistique** : L'ensemble des **MOD Modèles** avancent simultanément à l'aide des **PRO Processus** qui sont tous concourants. L'architecte aborde l'opportunité d'une *ville plus sûre* dans son intégralité, et va d'ailleurs tenter d'en explorer la plupart des aspects.
- **itératif** : Chaque **PRO Processus** se traduit dans son cheminement par une succession de **respirations**, autant d'itérations qui permettent de faire évoluer les modèles de la conception architecturale.
- **convergent** : Même si les cheminements des différents processus sont variés, tous se stabilisent après un certain nombre d'itérations. Même sans avoir défini ici une **qualité** pour chacun de ces modèles (cf. section 4.1.6 page 138), ces cheminements sont faits pour aboutir à un **état critique de pertinence** (cf. section 4.1.5 page 137).

- zigzagant : Les différents processus, bien que concourants, se renvoient la balle les uns aux autres. Par exemple, le **concept** de « *virtualisation des ressources* » est une idée (certainement pas la seule!) générée par le processus de **PRO Prospection** en réponse au **point critique** « *la malédiction des frontières administratives* ». Ce faisant, ce *nouveau* concept devrait rétroagir sur les processus de **PRO Contextualisation** (en se demandant si le mandant possède les atouts et les ressources pour affronter ce concept de virtualisation) et potentiellement de **PRO Cadrage/Pilotage** (levant un nouveau point critique si la réponse précédente est négative ou une nouvelle décision clé de sélection ou pas de cette option d'orientation).
- visant l'architecture : Ici, nous devrions dire « *en visant une orientation de l'architecture* ». La démarche n'élabore pas une orientation, mais des orientations qu'elle soumet aux parties prenantes, et contribue ainsi à la prise de décision et à la convergence vers une orientation que l'ensemble des parties prenantes jugera satisfaisante.

Au-delà d'illustrer le paradigme de la conception architecturale proposé, cette étude de cas permet d'afficher l'atteinte de deux objectifs que nous nous étions donnés.

capacité d'expliquer la démarche	Face à l'ampleur de la tâche, le paradigme aura permis de structurer la démarche de conception. Bien que l'architecte hésite, tâtonne, explore dans différentes directions cela participe d'une approche structurée qui peut être verbalisée. Au-delà du résultat (finalement nous ne savons pas quelle orientation pour une <i>ville plus sûre</i> a été retenue), il a été possible de décrire la manière d'y aboutir par la conjonction d'un certain nombre de processus permettant de faire évoluer les modèles de la conception architecturale vers un point critique.
capacité d'expliciter la démarche	La verbalisation suivant la notation proposée et à l'aide des différentes notions du paradigme permet de décrire précisément les différents cheminements. Si nous avons abordé cette conception comme étant d'un domaine nouveau, certains cheminements relèvent de schémas récurrents (<i>pattern</i>), ou sont candidats pour être capitalisé en tant que tel. La démarche de conception architecturale d'une <i>ville plus sûre</i> est à la fois partageable, car exprimable dans un référentiel, et à la fois capitalisable.

Notons également que la démarche de conception architecturale que nous avons adoptée pour aborder une opportunité complexe comme une *ville plus sûre* s'inscrit dans l'approche prônée par le cadre Cynefin pour les situations complexes (cf. section 2.3.3 page 65). Remarquons enfin que l'architecte n'adopte pas une démarche de résolution de problème et qu'il *ne tombe pas amoureux d'une solution*. Il ne s'accroche pas à un aspect, un concept, une alternative, mais ouvre l'espace des possibles tant que faire se peut pour aider les parties prenantes impliquées à choisir une orientation satisfaisante pour tous.

Chapitre 6

Conclusion et perspectives

« [...] toute théorie, y compris scientifique, ne peut épuiser le réel, et enfermer son objet dans ses paradigmes. »

Edgar Morin, *Le paradigme perdu*

L'architecture système tend à se distinguer voire à s'émanciper de son domaine parent, l'ingénierie système. Ce faisant, elle devient un nouveau domaine particulièrement saillant dans le cas de systèmes artificiels complexes. Nous avons cherché à doter ce domaine d'un paradigme de la conception architecturale.

Le paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes proposé dans ce manuscrit repose sur quelques fondements ou principes. Rappelons-les brièvement.

- L'univers de la conception architecturale est divisé en six espaces (**ESP** Infosphère, **ESP** Ressources, **ESP** Réel, **ESP** Perçu, **ESP** Envisagé et **ESP** Intermédiaire) instaurant une partition ternaire du monde de l'architecte (monde externe, monde interne et monde intermédiaire de la conception) ainsi qu'une partition ternaire du temps (*memoria, contuitus, expectatio*), formant ainsi une vision système de l'univers de la conception architecturale.
- Chacun de ces espaces est peuplé ou se peuple d'objets. Les objets qui nous occupent spécifiquement sont les artefacts produits par l'architecte pour sa conception, ainsi que dans une moindre mesure les artefacts produits par l'architecte ou les parties prenantes impliquées dans le projet de conception architecturale et qui servent d'intermédiaires entre l'architecte et ces parties prenantes. Le paradigme s'intéresse donc aux artefacts peuplant les espaces du **ESP** Perçu, de l'**ESP** Envisagé et de l'**ESP** Intermédiaire.
- Ces différents artefacts d'un espace donné s'agrègent en des modèles suivant leur type. Le paradigme propose le répertoire de modèles suivant : **MOD** But et **MOD** Contexte pour l'espace du **ESP** Perçu ; **MOD** Capacité, **MOD** Comptement attendu, **MOD** Forme, **MOD** Comportement émergent et **MOD** Concept pour l'espace de l'**ESP** Envisagé ; et **MOD** Média, **MOD** Cadrage/Pilotage et **MOD** Validation pour l'espace de l'**ESP** Intermédiaire.
- Des processus élémentaires (**PRO** Processus) permettent de faire évoluer chacun des modèles. Il y a donc autant de processus élémentaires que de modèles.

La table ci-après condense les différents éléments clés du paradigme : ESP Espace - MOD Modèle - PRO Processus.

L'espace. . .	est peuplé d'objets qui sont. . .	constituant le(s) modèle(s). . .	évoluant grâce au processus. . .
ESP Perçu	des artefacts (de la conception architecturale)	MOD But	PRO Désignation
		MOD Contexte	PRO Contextualisation
ESP Envisagé	des artefacts (de la conception architecturale)	MOD Capacité	PRO Détermination
		MOD Comp. attendu	PRO Clarification
		MOD Forme	PRO Proposition
		MOD Comp. émergent	PRO Simulation
		MOD Concept	PRO Prospection
ESP Intermédiaire	des artefacts (de représentation)	MOD Média	PRO Description
	des artefacts (de cadrage/pilotage)	MOD Cadrage/Pilotage	PRO Cadrage/Pilotage
	des artefacts (de validation)	MOD Validation	PRO Validation

- La démarche de conception a été conceptualisée sur quatre niveaux (trois développés dans ce manuscrit plus un) :
 - un niveau archétypal posant les principes de toute démarche de conception architecturale (cf. 4.8 page 148) ;
 - un niveau général, où les différents espaces sont le lieu de différents processus concourants, en conjonction complexe ;
 - un niveau particulier propre à chaque opportunité ou projet architectural. Nous avons proposé un protolangage (une notation de la conception architecturale) pour décrire chaque cheminement particulier ;
 - un niveau *boîte à outils*, non abordé dans ce manuscrit, qui rassemblerait les différentes opérations cognitives de l'architecte pour mener à bien sa démarche (analyse/synthèse, questionnement, abstraction, jugement, décision. . .).

Nous disposons donc, à défaut d'une théorie (elle n'a pas été construite comme telle), d'un paradigme de la conception architecturale. Certains points notables assoient le caractère spécifique de ce paradigme.

Mettre l'architecte au centre Celui-ci est souvent oublié dans les propositions de démarche architecturale des systèmes, et les énonciations actuelles prennent une posture résolument mécaniste (cf. en particulier [Mar16, ISO17]), posture numéro deux des caricatures de Jones (cf. section 1.3.1 page 18). Sans adopter une démarche entièrement anthropocentrique de la conception architecturale, nous nous rapprochons de la posture numéro trois des caricatures de Jones, dans laquelle l'architecte est à la fois un acteur et un observateur de

son propre travail (il se regarde apprendre et acquérir de nouvelles connaissances) rétroagissant sur son travail. La conséquence de cette posture est la sensibilité de toute production architecturale (le résultat d'une conception architecturale) à l'architecte, et sa non-reproductibilité.

Sortir de la résolution de problème

Si l'ingénierie en général, ou l'ingénierie des systèmes en particulier sont globalement des démarches de résolution de problèmes, adoptant et appliquant des méthodes scientifiques, la démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes se doit, si elle veut se distinguer de l'ingénierie, de ne pas être une nième démarche de résolution de problèmes. La forme canonique de telles démarches se réduit à « *poser le problème* », puis « *résoudre le problème* », faisant trop souvent fi de l'intelligence émotionnelle de celui qui pose le problème, ou de celui qui le résout. Nous avons préféré faire de la la conception architecturale des systèmes artificiels complexes, non pas un nouveau genre de démarche de résolution de problèmes, mais une démarche fondamentalement axée sur une vision diachronique qui, à partir d'une *perception* du temps présent, *élabore, imagine, construit* des futurs possibles et plausibles.

Percevoir et envisager

Il en découle que la partition ou le couple structurant de la démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes devient la perception et l'envisagé. En cela, nous nous éloignons de la traditionnelle partition fonction et forme, ou intentionnel et structurel.

Modéliser n'est pas dessiner

Nous avons déjà employé cet aphorisme dans un précédent ouvrage [LRW11]. Au-delà de son côté facétieux, nous avons voulu clairement distinguer ce qui relevait de la représentation d'architecture partageable, des artéfacts sur lesquels travaille l'architecte dans sa démarche de conception, c.-à-d. de perception du présent et d'élaboration du futur. Les artéfacts de travail de l'architecte tiennent de l'esquisse, de l'ébauche, du croquis, du griffonnage... C'est sur cette matière brute là que nous avons fait porter nos processus élémentaires de la conception architecturale, reléguant la production de représentations partageables (et potentiellement standardisées comme le proposent les cadres d'architecture) à un processus dédié, la description, ne relevant pas directement de la conception architecturale.

Évoluer globalement

Là où la plupart des démarches de conception proposent des transformations ou des raffinements ou des réifications successives d'une ou plusieurs représentations (souvent appelées abusivement *architecture X*, avec X qui vaut tantôt *fonctionnelle, opérationnelle, physique, logique...*) nous avons proposé des processus élémentaires qui font évoluer un modèle en particulier. Tous ces processus étant concourants et en conjonction complexe ils composent une démarche holistique. Les modèles de la conception architecturale, formés de l'ensemble des sept modèles de la conception architecturale, évoluent conjointement et itérativement vers un état de critique de pertinence (cf. section 4.1.5 page 137).

Cette proposition de paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes a permis d'atteindre un certain nombre de résultats.

Sortir du côté magique ou mécanique de la conception

En nous positionnant délibérément dans le cas trois des caricatures de Jones (cf. section 1.3.1 page 18), celui du concepteur auto-organisé, et en adoptant une démarche holistique et systémique, nous tournons le dos aux deux autres postures évoquées par Jones : le concepteur magicien et le concepteur ordinateur. Nous proposons une vision nouvelle dépassant ces postures incriminées.

Dépasser la décomposition-allocation	Là où la plupart des approches de conception système restent basées quasi exclusivement sur les mécanismes de décomposition et d'allocation, notre démarche de conception architecturale est basée sur un autre mécanisme de base : la respiration (succession de divergence – émergence – convergence) (cf. section 4.2.4 page 156).
Affronter la complexité	La démarche proposée au travers des respirations, des zigzags, de sa volonté de convergence permet de mettre en œuvre l'approche prônée par le cadre Cynefin (cf. section 2.3.3 page 65) pour affronter la complexité, à savoir : Expérimenter – Observer – Répondre. Ceci a été plus particulièrement illustré par notre étude de cas d'une <i>ville plus sûre</i> (cf. chapitre 5 page 175).
Expliquer la conception architecturale	Le paradigme permet d'expliquer et de rendre intelligible la démarche de conception architecturale des systèmes artificiels complexes. <i>A priori</i> , cela permet de doter l'architecte d'un cadre qui lui permet de penser et planifier son travail de conception. <i>A posteriori</i> , cela permet d'expliquer ce qui s'est passé et de donner du sens à des étapes où l'architecte tâtonne, hésite, diverge, ce qui aurait pu paraître comme déraisonnable, voire extravagant.
Verbaliser une conception architecturale	Le paradigme, dans sa conceptualisation de la démarche de conception architecturale propose un niveau particulier pour personnaliser et caractériser chaque opportunité ou projet architectural, et permettre ainsi de le raconter. Cette narration s'appuie sur une proposition de protolangage (une notation de la conception architecturale) pour décrire chaque cheminement particulier (cf. section 4.2.5 page 163). L'accumulation de ses différentes histoires ouvre la voie à une capitalisation et un partage des expériences.

Néanmoins, si de premiers résultats sont au rendez-vous, il reste encore des points à creuser. Le paradigme proposé affiche une cohérence et a cherché à embrasser la conception architecturale des systèmes artificiels complexes de manière holistique et systémique. Il mérite d'être étoffé, en particulier sur les aspects suivants.

Validation	Le paradigme proposé a été construit par une démarche essentiellement abductive et par bisassociations de paradigmes existants. Le résultat ne saurait prétendre à être une théorie scientifique. Nous ne pouvons que prétendre qu'elle est une bonne abduction selon les critères de Peirce et de Eco (cf. section 2.3.2 page 64). La confrontation que nous avons présenté avec un cas d'étude semi-fictif ne saurait en aucun cas tenir lieu de validation, et ne peut avoir que le statut d'illustration. Cette validation du paradigme reste donc à accomplir.
Vers un art de l'esquisse	Nous avons mis au centre du jeu de la conception architecturale opérée par l'architecte, les artéfacts qu'il produit en les différenciant des représentations partageables (les médias). Nous avons insisté sur la nature imprécise, floue, rudimentaire de ces artéfacts (esquisses, croquis, notes, brouillons...) contrairement au caractère précis, compréhensible et partageable des représentations produites par le processus de description de l'architecture. Pour autant, ces artéfacts sont porteurs de sens, et en référant au domaine de l'architecture en bâtiment et ouvrage d'art, les produire requiert un savoir-faire (qui est enseigné dans les écoles d'architecture). Dans notre domaine, il faudrait développer un langage de l'esquisse, et un art de les produire ¹ .

1. Par exemple, le *Design Thinking* ou les méthodes agiles promeuvent des techniques de prise de notes, de production d'esquisse ou de *sketchnoting* [ABP17].

Vers une formalisation des opérations

Nous avons défini un certain nombre de processus élémentaires portant sur des modèles de la conception architecturale (cf. section 4.1.8 page 144). Un processus est l'enchaînement, ou plutôt l'imbrication cohérente d'opérations de la conception. Nous nous sommes contenté de définir une opération de conception architecturale de manière générique, subsumant tout type d'opération élémentaire (nous en avons cité quelques-unes : identification, définition, spécification, modifications – reformulation, évolution, transformation –, expansion, contraction). Il resterait à en faire un catalogue exhaustif, donner une sémantique opératoire à chacune des opérations ainsi identifiées, et à potentiellement doter cet ensemble d'opérations élémentaires ainsi défini d'une algèbre de composition. Cela permettrait de formaliser le fait qu'un processus de la conception architecturale est l'imbrication, c.-à-d. la composition de ces opérations. Cette formalisation amènerait les bénéfices suivants :

- cela accroîtrait le pouvoir expressif du paradigme et par la même augmenterait sa capacité à expliquer et à expliciter la conception architecturale des systèmes artificiels complexes ;
- cela donnerait un moyen de tracer et enregistrer des exécutions de processus, et ouvrirait la voie à l'identification de schémas récurrents (*pattern*) et à la capitalisation et au partage de ces exécutions.

Vers une formalisation des modèles

Nous avons distingué trois niveaux d'organisation des modèles : classement, structurel et système (cf. section 4.1.7 page 141). Nous nous sommes cantonné au premier niveau, celui de classement, en nous appuyant sur la théorie des ensembles. Cela nous a permis d'introduire les notions de *surface* et de *dimensions* d'un modèle et ainsi d'amener les principes suivants :

- modéliser ne se résume pas à cibler un ou plusieurs diagrammes puis à les peaufiner, mais dans une démarche de conception architecturale à servir de support à une exploration en largeur (expansion ou divergence), puis à une sélection des options les plus pertinentes, ou une élimination des options jugées inappropriées (contraction ou convergence). Cet aspect est saisi par la notion de *surface* et de *contour surfacique* du modèle (l'évolution dans le temps de sa surface) (cf. section 4.2.5 page 161) ;
- les caractéristiques d'une opportunité à étudier peuvent être singulières. Si un catalogue de caractéristiques spécifiques peut être utilisé à bon escient (ce que proposent par exemple les cadres d'architecture au travers des vues standardisées), chaque opportunité doit faire l'objet d'une attention particulière. Nous avons considéré qu'il était du ressort de l'architecte de colorer son travail des caractéristiques qu'il juge pertinentes. La notion de *dimensions* exprime cette idée-là.

Les deux autres niveaux d'organisation (structurel et système) restent à formaliser, à la fois pour donner une sémantique plus forte à des notions encore floues ou imprécises et à la fois pour toucher d'autres principes de la conception architecturale.

Vers une intégration plus large du temps

L'architecte se doit de penser dynamiquement une forme dynamique. Nous avons adressé le premier usage du terme dynamique (qui se traduit par le côté itératif, zigzagant, respirant, convergent... de la démarche de conception architecturale) et laissé de côté le deuxième. Cet aspect dynamique de la forme doit embrasser au moins deux points de vue :

- le passage d'une situation présente à une situation future envisagée. Nous ne partons pas de rien, et la plupart du temps, l'architecte est confronté à l'évolution, la mise à niveau, la réparation... d'un système existant (ce que les Anglo-saxons nomment le *legacy*);
- les évolutions, modifications, recomposition possible de la forme une fois mise en œuvre. Quelles seront ses histoires futures possibles ?

Ceci appelle à disposer d'un formalisme ou d'un langage de la forme ciblé sur son évolution, sa dynamique. Une première vision simpliste d'un tel langage produirait une liste d'opérateurs, rendant compte de la dynamique de la forme, de la sorte :

- des opérateurs portant sur les éléments constitutifs de la forme : unification, séparation (ou dislocation), etc. ;
- des opérateurs portant sur la structure, c.-à-d. les liens, les relations, les interactions, de la forme : accouplement, isolation, ségrégation, éloignement, rapprochement, etc. ;
- des opérateurs portant sur la modification de la forme : apparition, disparition, remplacement, etc.

Il convient d'aller plus loin, l'architecte se devant d'être un scénariste du futur et non un photographe.

De manière à étoffer notre paradigme, la confrontation (la bissocation pourrions-nous dire) avec d'autres travaux pourrait déboucher sur des améliorations notables. Voici quelques pistes ou suggestions.

Une grammaire de la forme ? Par analogie avec le monde de l'architecture en bâtiment, nous pourrions chercher à nous doter d'un langage descriptif de la forme suffisamment riche. Les ouvrages de A. Di Mari [DMY12, DM14] peuvent être à ce titre très inspirants. Citons à titre d'exemple quelques verbes issus de [DM14] pour décrire et formaliser le fait de *connecter* des éléments entre eux : étendre (*expand*), emboîter (*nest*), diviser (*split*), encastrer (*interlock*), lever (*lift*), recouvrir (*overlap*), déplacer (*shift*), découper (*carve*), fracturer (*fracture*), extraire (*extract*).

Des opérations de la conception ? Plusieurs sources d'inspirations devraient nous permettre d'enrichir notre réflexion sur les opérations de la conception. Tout d'abord dans le domaine de l'ingénierie ou de la conception de produits, nous pouvons nous référer aux :

- six opérateurs de modularité [BC00] : division (*splitting*), substitution (*substitution*), exclusion (*exclusion*), augmentation (*augmenting*), inversion (*inversion*), portage (*porting*) ;
- opérateurs de créativité d'ASIT (*Advanced Systematic Inventive Thinking*) [Hor04] : unification, multiplication, division, suppression, rupture de symétrie.

Nous pouvons également de nouveau aller puiser dans le domaine de l'architecture en bâtiment. Dans ce domaine, deux propositions nous paraissent intrigantes et fécondes.

- Le concept d'échelle de P. Boudon [BDPS00, Bou04]. De manière basique, l'idée est de partir d'un schéma de base et de lui appliquer une *échelle*, c.-à-d. le transformer suivant ou autour d'un aspect particulier. Cette idée pourrait nous servir pour définir comment une forme est élaborée à partir d'une forme basique, ou d'un schéma récurrent (*pattern*), puis démultipliée ou adaptée à l'aide d'un opérateur qui la mette à l'échelle.

- À ce concept d'échelle, D. Raynaud oppose l'idée du schème comme opérateur de la conception [Ray99]. Il nous invite alors à nous pencher vers une exploration systématique des verbes et des schèmes de la langue. En ce sens, l'exploitation de l'ouvrage de J. Dubois et F. Dubois-Charlier, *Les verbes français* [DDC97], pourrait se révéler fructueuse. Cela permettrait peut-être de doter l'architecte d'un vocabulaire de base comprenant les actions de base qu'il peut effectuer sur une forme pour la compléter ou la transformer. Cela devrait l'aider à élaborer diverses formes alternatives (« *et si j'appliquais tel opérateur, que deviendrait ma forme ?* »), voire à mécaniser ou systématiser cette exploration (explorer le graphe des enchaînements possibles d'opérateurs appliqué à une situation de départ pour chercher à faire de l'*optimisation de forme* par exploration de l'espace atteignable des formes possibles).

Une narration illustrée de la conception ou de l'évolution de la forme ?

Comment aider l'architecte à n'être pas qu'un photographe, mais un scénariste ? Les travaux de N. Henry portent principalement sur la visualisation et la manipulation de graphes et de matrices [HF06, HFM06, BBHR⁺16]. Ces publications récentes ont porté sur la façon de raconter l'évolution dans un graphe [BKH⁺16, BLB⁺17]. Si nous admettons qu'un graphe peut être une formalisation acceptable de la forme (une formalisation de niveau structurel du modèle de la forme), alors N. Henry et ses collègues proposent des modalités originales et attrayantes pour exprimer de manière graphique une narration de la forme, et sans doute une narration de la conception.

Une formalisation plus poussée ?

Notre proposition de paradigme est à ce jour encore non formelle. Il mériterait sans doute d'être confronté, puis assis par des formalismes fondés sur des théories, et en particulier des théories mathématiques. Dit autrement, un travail ontologique plus approfondi reste à mener pour renforcer le paradigme. Les sources d'inspirations sont multiples. Nous pouvons certainement en trouver dans les travaux passés. Citons pour exemple : le travail ontologique sur les systèmes de M. Bunge [Bun79], les tentatives de théorisation mathématique de la notion de système par W. Wymore [Wym67], M. Mesarovic [MT75] et Yi Lin [Lin06], la formalisation du raisonnement spatial et temporel de O. Stock [Sto98]. Des travaux récents se reposant sur la théorie des catégories méritent également une attention particulière. Que cela soit dans une approche amont de formalisation de l'ingénierie des systèmes comme le propose D. Luzeaux [Luz15], ou dans une démarche aval de modélisation, ce que nous offrent par exemple les travaux de D. Ernadote dans le domaine [Ern15, Ern16, Ern17].

Au-delà de ces pistes de consolidation du paradigme, celui-ci ouvre à notre sens sur divers prolongements.

Des répertoires

Ce paradigme proposant des mécanismes de description, voire de narration de la conception architecturale, il devient possible de capturer des expériences vécues selon ce prisme, de les enregistrer et de les verser dans des répertoires privés (ceux d'une entreprise, par exemple) ou ouverts (partageable avec la communauté de l'ingénierie système et de l'architecture système). Cette jurisprudence offrirait la possibilité de potentiellement dégager des schémas récurrents de la conception architecturale, candidats à devenir des *bons* principes ou des *bonnes* règles, ouvrant ainsi la voie à établir un art de la conception architecturale.

Des guides

Sans forcément prétendre pouvoir écrire un traité de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes (le statut courant du paradigme et l'absence de répertoires précités sont des verrous quasi bloquants à ce stade), divers guides méthodologiques peuvent être envisagés. Le paradigme donne un cadre pour expliquer,

voire expliciter des démarches particulières. Il serait donc possible de particulariser tel ou tel domaine, ou telle ou telle typologie d'opportunité pour en dériver des guides ou manuels pratiques. À des fins d'illustration, voici quelques titres potentiels de tels ouvrages : « *Comment concevoir l'architecture d'un système de systèmes ?* », « *Comment concevoir l'architecture d'un système robuste, sûr, résilient, flexible, etc. ?* », « *Comment concevoir l'architecture d'un hôpital digital (ou de tout autre système complexe face au défi de la digitalisation) ?* » En ce sens, notre paradigme offrirait un cadre unifiant à tous ces guides (ou autres déclinaisons sous diverses modalités) spécifiques.

Un apprentissage Ce paradigme permet de donner des bases pour élaborer un enseignement de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes à un niveau universitaire. À ce jour, l'auteur de ce manuscrit s'en sert pour fonder des formations qu'il dispense soit en formation initiale en école d'ingénieurs (ENAC, INSA, CentraleSupélec au profit d'étudiants en 4^{ème} ou 5^{ème} année, soit un équivalent M1 ou M2), soit en formation professionnelle (X/EXED). Ceci pourrait être d'autant plus renforcé si nous bénéficions à la fois d'un répertoire ouvert d'expériences passées pouvant faire l'objet d'un enseignement, et d'un manuel de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes adapté à l'auditoire (visant une population d'étudiants de niveau M1/M2)

Un outil Si aujourd'hui de nombreux outils (informatiques) proposent diverses alternatives pour supporter la description d'architecture, à notre connaissance il n'en existe aucun supportant la conception architecturale des systèmes artificiels complexes. En fait pour répondre à l'activité de description, tous les outils existants proposent d'éditer des schémas, des diagrammes, des tableaux, etc., standardisés ou non, et leur plus-value réside dans la cohérence et la précision de l'ensemble des éléments décrits et le respect strict d'une syntaxe. Aucun ne permet d'adresser les artéfacts que nous avons évoqués (esquisses, brouillons, ébauches, notes...), avec leur flou, la multiplicité de leurs instances pour le même sujet (la surface du modèle), leur sémantique propre, les diverses dimensions et les diverses structurations possibles. Également, aucun ne nous semble aider à formaliser une narration de la conception ou une narration de l'évolution de la forme. Cet outil d'aide à la conception architecturale des systèmes artificiels complexes reste donc à développer. Notre paradigme est un point de départ pour le penser, et pour aider à le concevoir dans un monde plus digital.

Cette proposition de paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes se veut constituer une étape fondamentale dans la fondation de ce nouveau domaine que se trouve être l'architecture des systèmes complexes. À la fois, cette proposition appelle à de multiples renforcements, ouvre de nombreuses perspectives et prolongements, et semble constituer un cadre unificateur des diverses démarches et approches de la conception architecturale. C'est peut-être là son mérite.

Annexes

Annexe A

Frises historiques

Cette annexe comprend des captures d'écran de la frise historique de l'ingénierie système que nous avons élaboré à l'aide du logiciel Tiki Toki.

Les codes couleurs suivants ont été utilisés pour catégoriser les éléments de la frise.

TABLE A.1: Codes couleur et catégories

	Science et Théorie	Les ouvrages marquants à caractère scientifique, ou théorique.
	Ingénierie et Architecture	Les ouvrages marquants dans le domaine de l'ingénierie système ou de l'architecture (des systèmes).
	Guide et Standards	Les guides et les normes marquantes dans le domaine de l'ingénierie système et de l'architecture.
	Repères historiques	Quelques repères historiques sur des institutions, des programmes. . . dans le domaine de l'ingénierie des systèmes.

Ces frises sont restituées suivant deux présentations :

- une présentation dite *détaillée*, où les éléments sont tous mis sur une échelle temporelle, et leur représentation comprend l'ensemble des détails ;
- une représentation dite *thématique*, où les éléments sont triés verticalement en bande, une bande correspondant à une catégorie.

A.1 Frises détaillées

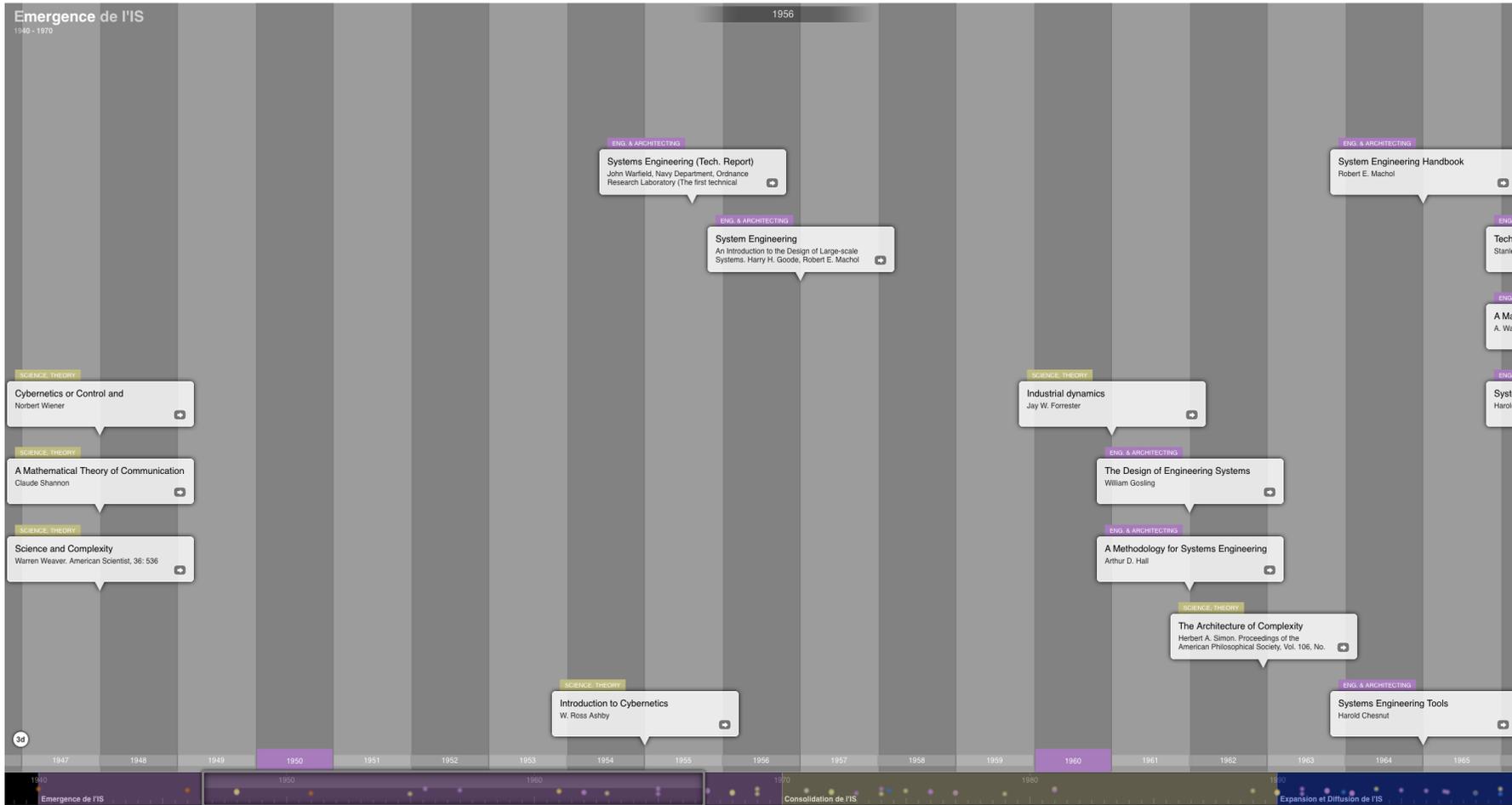


Figure A.1: Frise historique détaillée de l'Ingénierie Système, période 1940..1965

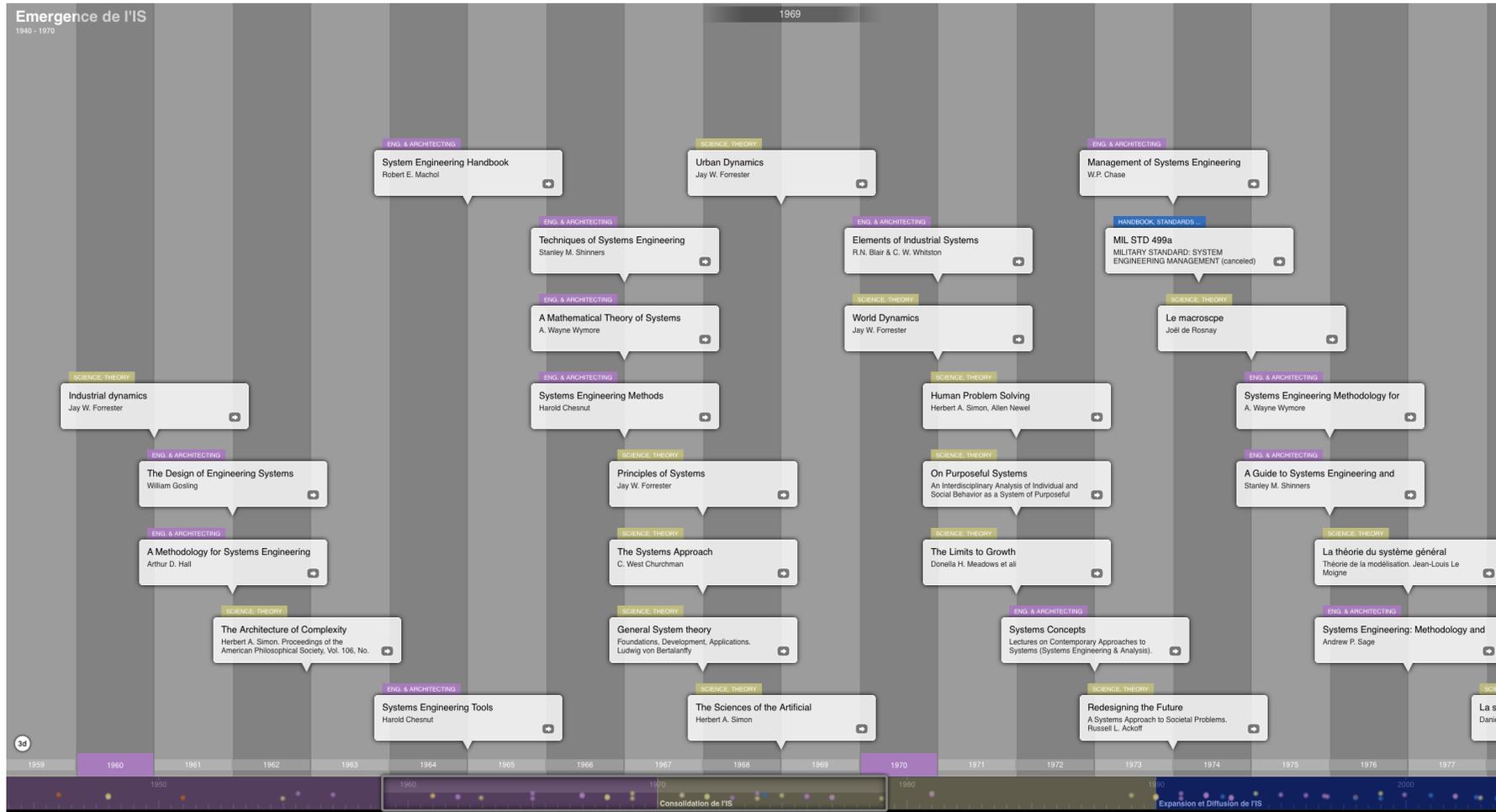


Figure A.2: Frise historique détaillée de l'Ingénierie Système, période 1960..1977

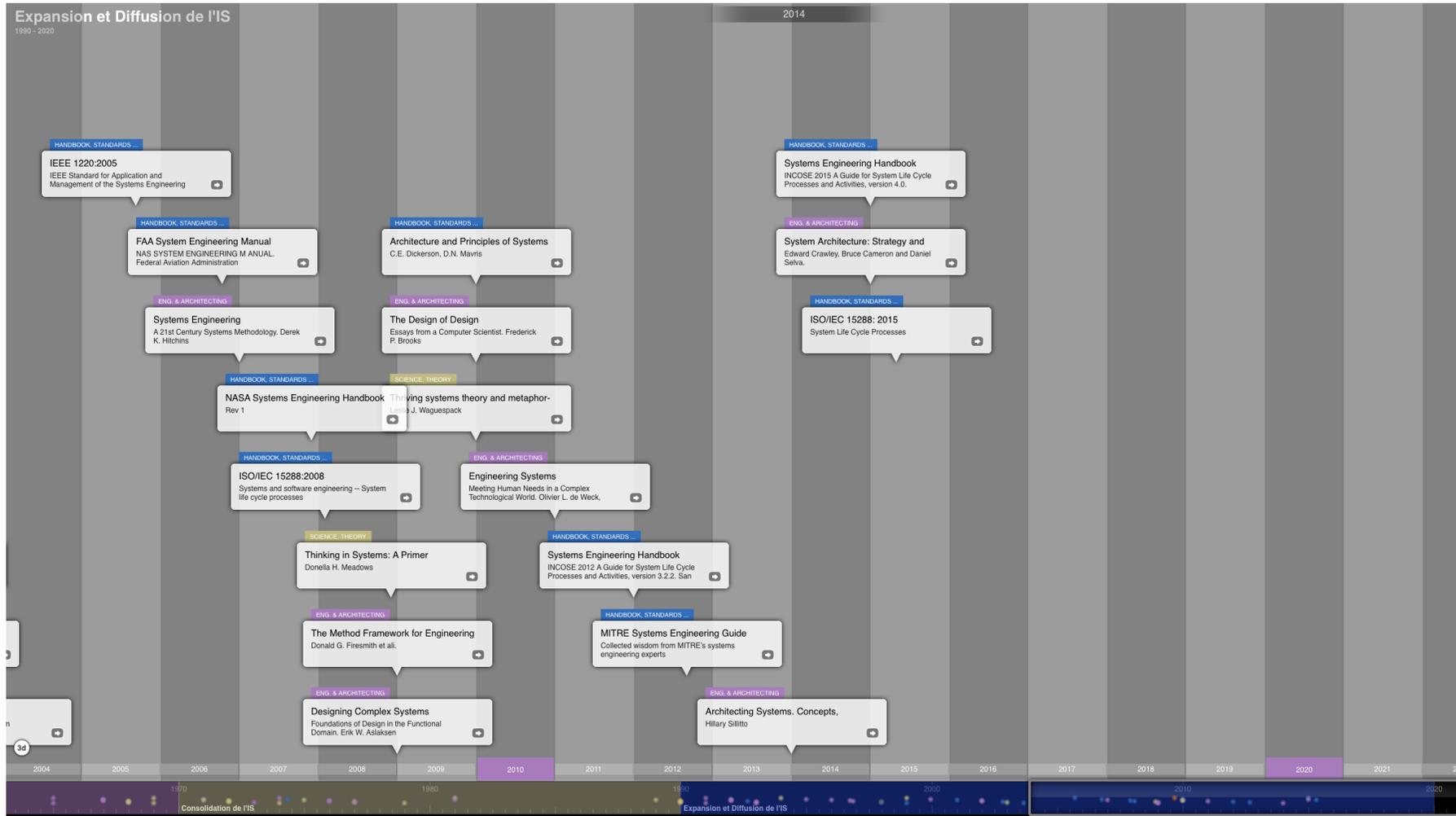


Figure A.5: Frise historique détaillée de l'Ingénierie Système, période 2005..2020

A.2 Frises thématiques

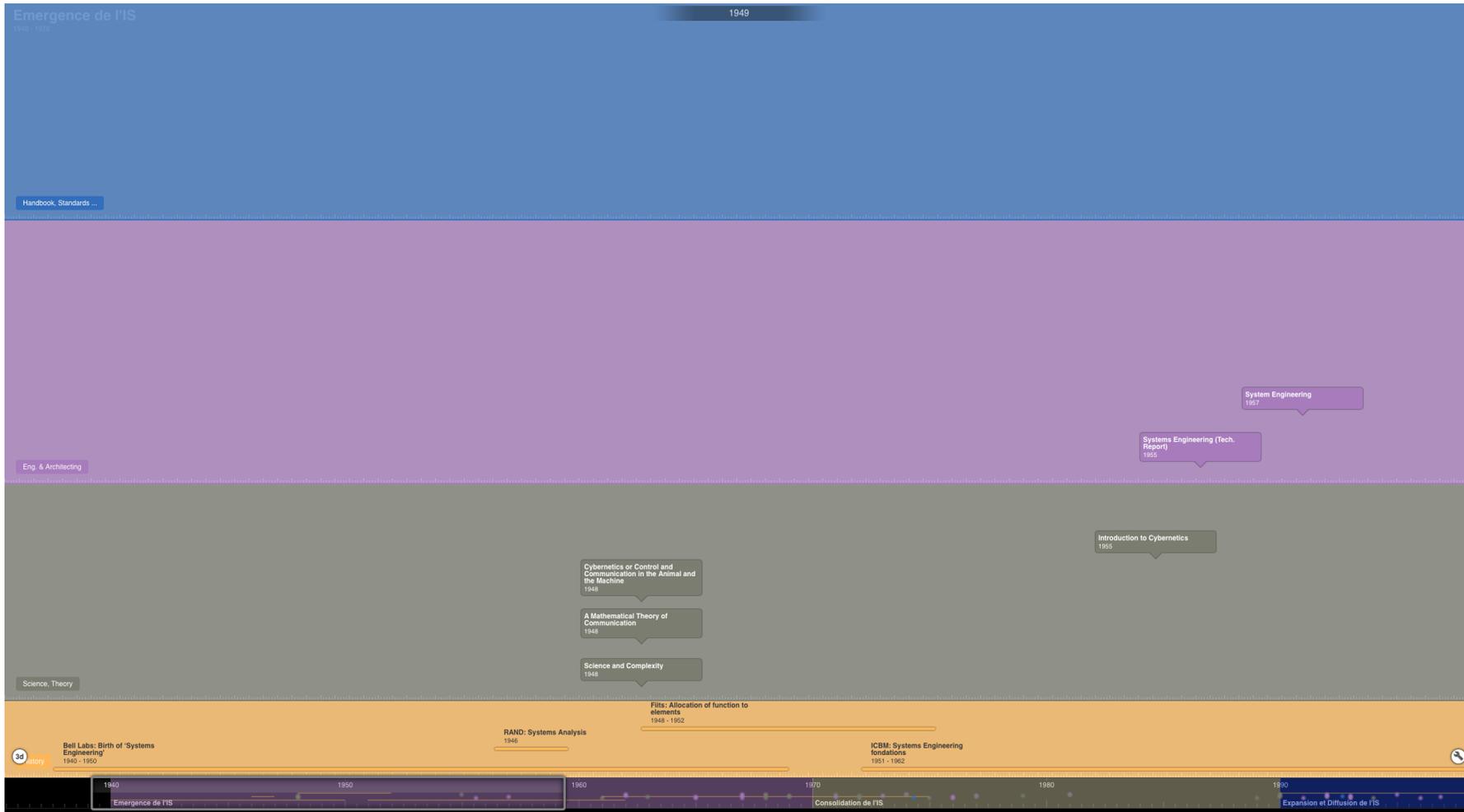


Figure A.6: Frise historique thématique de l'Ingénierie Système, période 1940..1960

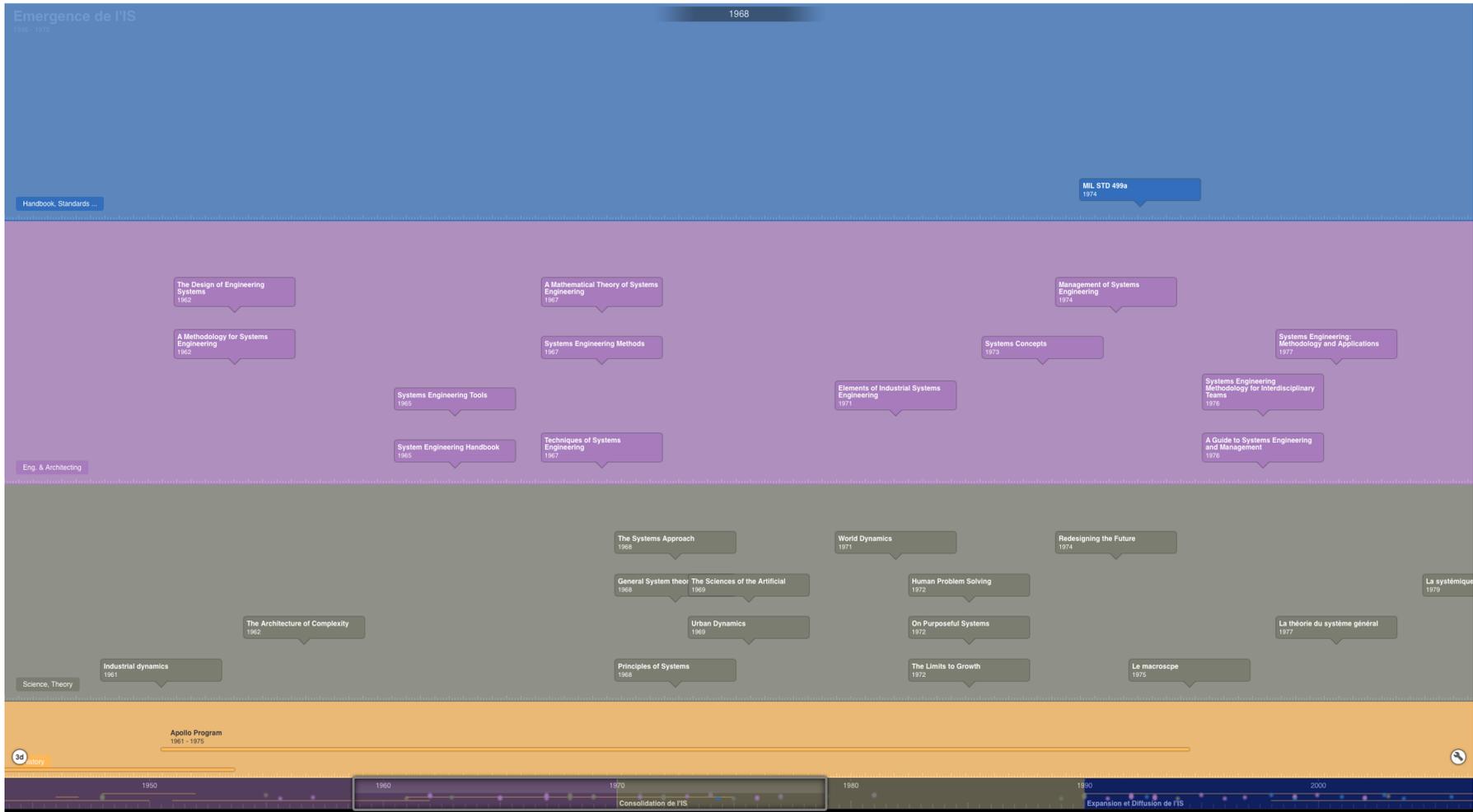


Figure A.7: Frise historique thématique de l'Ingénierie Système, période 1958..1978

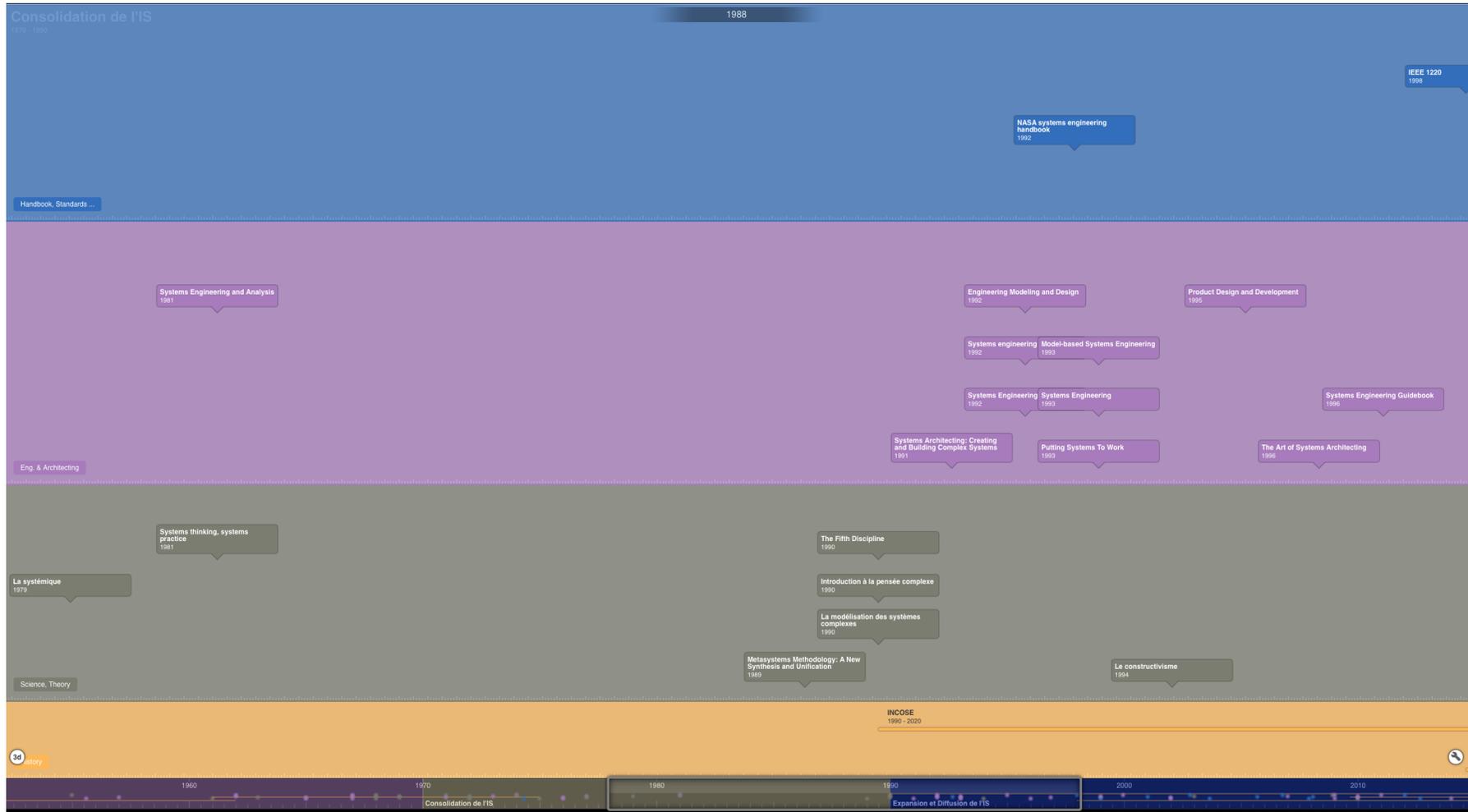


Figure A.8: Frise historique thématique de l'Ingénierie Système, période 1978..1998



Figure A.9: Frise historique thématique de l'Ingénierie Système, période 1996..2016

Annexe B

Compléments sur la forme

Nous reprenons ici majoritairement des éléments qui ont publiés dans [LRW15] que nous complétons parfois.

Sommaire

B.1	Décomposition structurelle et organisation	220
B.2	Liens et relations	226

B.1 Décomposition structurelle et organisation

B.1.1 Les trois *P*

Nous avons souvent tendance à penser que les éléments constitutifs d'un système ne sont que des éléments tangibles et artificiels, restreignant ainsi la notion de système à des produits technologiques plus ou moins compliqués ou plus ou moins intégrés. C'est faire fi de systèmes tels que les systèmes d'informations et de décision, les systèmes sociotechniques ou organisationnels (une entreprise, une armée, une institution, etc.).

En reprenant la définition de la norme MIL-STD-499B [DoD94], la nature des éléments constitutifs d'un système est soit un produit, soit une personne, soit une procédure (les trois *P* !):

- produit : élément cohérent et artificiel pouvant être constitué de matériel, logiciel, données, services, ressources, etc.
- personne : être humain jouant un rôle spécifique ;
- procédure (ou processus, ou protocole) : spécification d'une série d'actions ou d'opérations à exécuter pour obtenir un résultat, qui permet entre autres de décrire comment doivent être utilisés les *Produits* par les *Personnes* pour réaliser les missions du système.

Revenons plus particulièrement sur deux points singuliers de cette typologie, et notons tout d'abord que la notion de produit utilisée ici recouvre un spectre plus large qu'un simple élément tangible et matériel. Si certains sont immatériels, comme un logiciel, ou avec un contenu informationnel, comme des données, d'autres peuvent être abstraits et non stockables (contrairement aux données) comme des services, c.-à-d. en première approche la mise à disposition d'une capacité à effectuer quelque chose au profit d'un autre (le consommateur de ce service).

Évacuons ensuite l'objection qui consiste à dire que l'humain ne saurait faire partie d'un système relevant de l'ingénierie système au prétexte qu'il n'est pas un élément artificiel, et donc de le reléguer comme un élément systématiquement externe (simple utilisateur ou opérateur du système). Au contraire, il faut comprendre une personne comme élément constitutif d'un système, non pas dans son individualité (morale ou physique), mais de par le rôle qu'elle joue dans le système. Par exemple, dans le système « école », il y a des personnes qui ont un rôle d'enseignant (les instituteurs, les professeurs), et d'autres un rôle d'apprenant (les élèves). Enseignants et apprenants sont donc bien des éléments constitutifs du système école.

Admettons que l'usage du substantif « *Personne* » est quelque peu elliptique – nous devrions dire « *le rôle joué par une personne au sein du système* » – mais il possède la commodité d'offrir un moyen mnémotechnique pour la nature des éléments d'un système : « *3P* ».

B.1.2 Organisation récursive en sous-systèmes

Devant la complication qu'engendrerait une trop grande cardinalité des éléments et des liens constitutifs de la forme d'un système, nous avons pour habitude d'organiser hiérarchiquement ces éléments sur plusieurs niveaux. Nous suivons en cela le constat d'Herbert Simon : "The fact that many complex systems have a . . . hierarchic structure is a major facilitating factor in enabling us to understand those systems." ([Sim69]), appliquant le célèbre motto : *Divide ut regnes* (Diviser pour régner). Ainsi, cette organisation consistant à partitionner la forme en sous-ensembles ou blocs distincts, et ce sur plusieurs niveaux de décomposition, abouti à un arrangement structurel arborescent de la forme. Classiquement nous retrouvons les termes de

PBS (*Product Breakdown Structure*) ou de SBS (*System Breakdown Structure*) pour témoigner de cette organisation. La décomposition récursive d'un niveau donné en une partition de sous-blocs (vision descendante), ou l'imbrication des blocs d'un niveau donné en un bloc de niveau supérieur (vision ascendante) nécessite l'application de l'ingénierie système pour tous les blocs à tous les niveaux et de manière coordonnée. C'est de cette manière que l'ingénierie système organise et affronte la complexité des sujets dont elle a l'étude. Voici quelques principes de base pour mettre cela en pratique :

- Chaque bloc système, quel que soit son niveau dans la hiérarchie d'imbrication doit faire l'objet d'une ingénierie système à part entière.
- Pour un bloc donné, le contexte d'étude (la façon d'appréhender le dit bloc) de l'ingénierie système doit se restreindre, tant que faire se peut, aux éléments externes directement en interaction avec le bloc en question (les éléments du contexte), et aux éléments de décomposition de niveau immédiatement inférieur.
- Concernant les éléments externes, ils sont abstraits au niveau englobant le plus élevé possible vis-à-vis du bloc considéré (principe d'encapsulation). Par exemple (cf. Figure B.1) quand l'objet d'étude est un des sous-systèmes du système d'intérêt de départ, l'autre sous-système (et non ses éléments constitutifs) devient un élément externe du contexte du sous-système cible.
- Les différentes ingénieries systèmes sur les différents niveaux à considérer sont menées de manière concurrente (et bien sûr non séquentielle). Elle nécessite donc des coordinations inter niveaux : chaque niveau donné se doit de suivre et coordonner les ingénieries de niveau immédiatement inférieur.

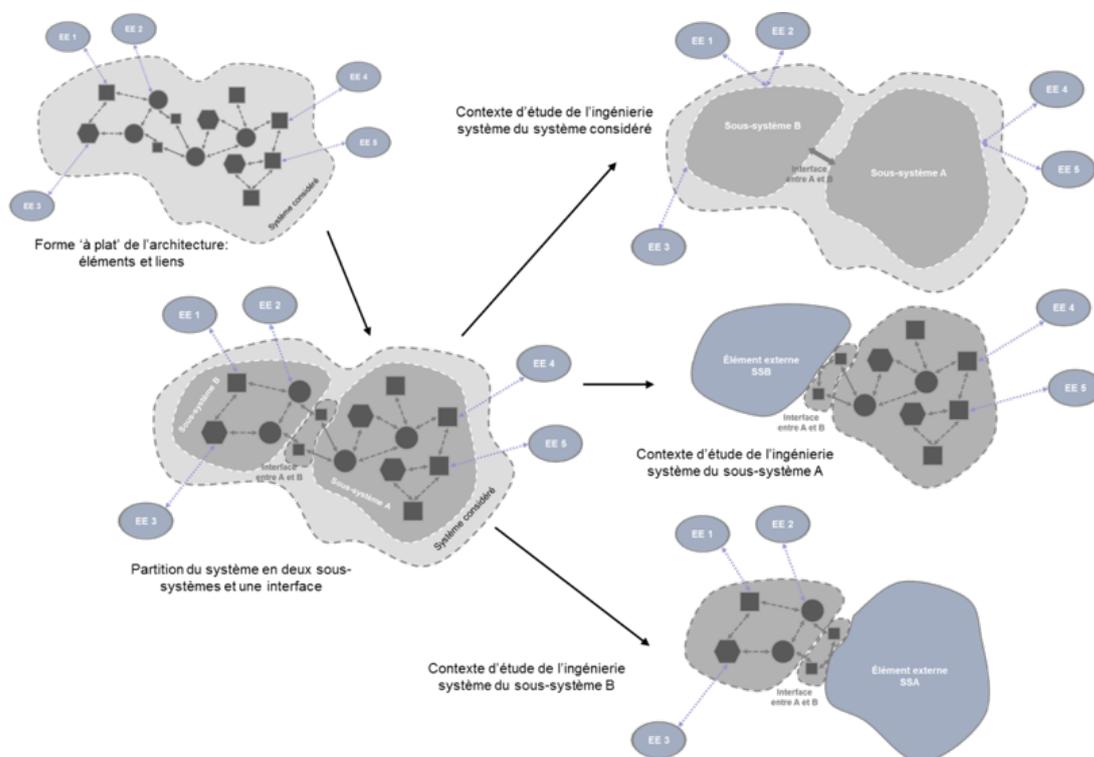


Figure B.1: Ingénierie système multi-niveaux

Nous pouvons remarquer qu'en procédant de la sorte, chaque ingénierie pour un bloc donné travaille sur une vision partielle abstraite mais non réduite (au sens du réductionnisme). L'ingénierie système ne simplifie pas la complexité, elle l'organise dans une approche holistique. Suivant les domaines et les standards pratiqués, une dénomination des blocs systèmes en fonction du niveau de décomposition (ou d'intégration) sera adoptée. Nous trouverons par exemple des termes comme : *segment, composant, unité, division, module*. . . Pour notre part, nous adopterons le terme générique de sous-système. Tentons une définition plus formelle de cette notion de sous-système. Pour cela partons d'une définition et de la formalisation d'un système, celle de Mario Bunge : « *Un système est un objet complexe dont les parties ou composantes sont liées de telle façon que l'objet se comporte, à certains égards, comme une unité et non pas comme la simple réunion de ses éléments* » ([BDt83])

Ce qui lui permet de formaliser un système de la façon suivante :



Définition B.1

[Système (selon M. Bunge)]

Une chose S est un système concret si et seulement si S peut être représenté de façon adéquate par le triplet ordonné de trois ensembles :

$m = \langle \text{composition de } S, \text{milieu de } S, \text{structure de } S \rangle$, où

- la composition de S est l'ensemble des parties de S , ensemble composé d'au moins deux éléments ;
- le milieu ou l'entourage de S est l'ensemble des choses concrètes distinctes des composantes de S qui s'unissent à celui-ci, ou encore qui agissent sur S ou sont affectés par S ;
- la structure de S est l'ensemble des relations entre les composantes de S , ainsi que les relations qui existent entre les composantes de S et les composantes du milieu de S . Une structure telle que cet ensemble comporte au moins une connexion ou une liaison.

Puis d'introduire une définition d'un sous-système d'un système :



Définition B.2

[Sous-système (selon M. Bunge)]

Soit σ un système représenté par l'ensemble des trois éléments $\langle C(\sigma), E(\sigma), S(\sigma) \rangle$.

σ' est un sous-système de σ , si et seulement si :

- σ' est un système (et non un simple agrégat) ;
- La composition de σ' est comprise dans la composition de ;
- Le milieu de σ' est inclus dans celui de σ ;
- La structure de σ' est incluse dans celle de σ .

Tout sous-système étant lui-même un système, cette définition traduit bien la nature récursive de l'organisation d'un système. Afin de mieux rendre compte de la définition de système que nous avons adoptée¹ et des termes introduits dans la définition de la forme, permettons-nous de compléter et modifier la définition de Mario Bunge de la manière suivante :

1. Pour mémoire, celle de l'ISO/CEI 15288 :2015 : « *un ensemble d'éléments, en interaction dynamique, organisés pour atteindre un ou plusieurs buts* » ("A combination of interacting elements organized to achieve one or more stated purposes".)



Définition B.3

[Système]

Une chose S est un système artificiel si et seulement si S peut être représenté de façon adéquate par le quintuplet ordonné de sous-ensembles :

$m = \langle \text{but de } S, \text{contexte de } S, \text{composition de } S, \text{structure de } S, \text{comportement de } S \rangle$ où :

- le but de S est l'ensemble des buts établis pour S ;
- le contexte de S est l'ensemble des choses artificielles ou non distinctes de S qui se lient à celui-ci, ou qui interagissent avec S ou sont affectés par S . Ces choses pouvant être d'autres systèmes ;
- la composition de S est l'ensemble des éléments constitutifs (Produit, Personne ou Processus) de S , ensemble composé d'au moins deux éléments ;
- la structure de S est l'ensemble des relations et des liens entre les composantes de S , ainsi que les relations et les liens entre les composantes de S et les composantes du milieu de S ;
- le comportement de S est l'ensemble des modèles qui décrivent la manière dont le système évolue et se comporte dans son contexte lorsqu'il est sollicité ou non (il peut y avoir un comportement au repos).

Cette définition reste néanmoins critiquable et encore fragile. Notons au minimum que :

- La composition comme la structure de S peuvent évoluer dans le temps,
- La composition comme la structure de S peuvent comprendre des composantes, des relations ou des liens incertains ou optionnels,
- Le contexte n'est pas forcément unique mais peut être multiple (divers contextes opérationnels, ainsi que des contextes de développement, de production, d'intégration, de validation, de maintenance, d'entraînement. . .)

Néanmoins, complétons-là par la définition d'un sous-système, dans la même veine que celle proposée par Mario Bunge.



Définition B.4

[Sous-système]

Soit σ un système représenté par $\sigma = \langle \text{But}(\sigma), \text{Contexte}(\sigma), \text{Composition}(\sigma), \text{Structure}(\sigma), \text{Comportement}(\sigma) \rangle$.

σ' est un sous-système de σ , si et seulement si :

- σ' est un système (et non un simple agrégat) ;
- le $\text{But}(\sigma')$ contribue au $\text{But}(\sigma)$;
- le $\text{Contexte}(\sigma')$ est inclus dans $\text{Contexte}(\sigma) \cup (\text{Composition}(\sigma) \setminus \text{Composition}(\sigma'))$
- la $\text{Composition}(\sigma')$ est comprise dans la $\text{Composition}(\sigma)$;
- la $\text{Structure}(\sigma')$ est incluse dans la $\text{Structure}(\sigma)$;
- le $\text{Comportement}(\sigma')$ peut permettre d'expliciter partiellement $\text{Comportement}(\sigma)$;

Réagissons d'emblée à cette définition en apportant les remarques suivantes :

- Le but d'un sous-système n'est pas un sous-but ou n'est pas forcément une partie issue d'une décomposition du but du système, mais bel et bien une contribution à l'atteinte du but de niveau supérieur. Par exemple, le but d'une frégate de lutte anti-sous-marine, comme son nom l'indique, est la protection ou le combat contre les menaces sous-marines. Parmi les sous-systèmes la composant, nous trouvons le sous-système propulsif, dont le but est d'assurer la propulsion du navire. « *Propulser le navire* » contribue bien évidemment à la capacité de la frégate de remplir son objectif de lutte anti-sous-marine, mais ne saurait être considéré comme un sous-but ou une partie d'une lutte anti-sous-marine. Cette *non-inclusion* simple, mais contribution du but d'un sous-système envers son (ou ses) système(s) préfigure une forme d'autonomie téléologique du sous-système.
- Le contexte d'un sous-système n'est pas simplement inclus dans le contexte du système de niveau supérieur. C'est d'ailleurs une critique que nous pouvons ériger envers la définition originale de Mario Bunge. En effet, la composition d'un sous-système étant une partie de la composition du système, les éléments du complémentaire de cette composition par rapport à la composition du système peuvent avoir des interactions ou des liens (éléments de la structure du système) avec les éléments du sous-système, et donc faire partie du contexte de ce dernier.
- Le découplage apparent entre comportement au niveau sous-système et niveau système laisse entrevoir la notion d'émergence que nous verrons plus loin. En effet, le comportement du tout n'est pas toujours simplement agrégatif, additif ou cumulatif des comportements des parties, selon le célèbre motto « *le tout est plus grand que la somme des parties* ». La manière dont ces parties sont agencées entre elles et la manière dont elles interagissent entre elles influencent le comportement global. Le comportement global n'est pas réductible aux comportements des parties.

En synthèse partielle, notons que le passage d'un niveau de partitionnement à un autre (récursion), se fait avec une continuité structurelle, mais une discontinuité en termes d'objectifs et de comportement.

B.1.3 Holarchie

Toute dissection d'un système n'amène pas à une partition système en sous-systèmes, de même que tronçonner un système géométriquement en tranches n'a pas de sens en ingénierie système (par exemple, découper une voiture par tranches longitudinales n'aboutirait pas à une vision en sous-systèmes d'un véhicule!), ou partitionner en regroupant les éléments par leur nature (les personnes d'un côté, les matériels d'un autre, les logiciels encore d'un autre. . .). Cette dernière erreur de perspective, compliquant les choses car ne les organisant pas de manière efficace vis-à-vis de la maîtrise de la complexité d'un système, est malheureusement bien trop souvent commise.

Bref si nous nous contentons de parcelliser la forme de l'architecture en sous-ensembles imbriqués les uns dans les autres, nous risquons de tomber sur des visions peu propices à affronter la complication, voire la complexité. En effet, pour permettre une ingénierie à la fois concourante et à la fois relativement autonome de chacun de ses sous-ensemble cette partition et organisation hiérarchique doit être faite avec soins. Elle doit aboutir à des sous-systèmes ayant leur propre forme de cohérence locale, tout en participant clairement de la cohérence globale. Chaque sous-système est à la fois une partie d'un tout plus grand et à la fois lui-même un système, un tout intègre. Cette dualité tout/partie renvoie au concept d'holons² et d'holarchie introduite par A. Koestler dans son ouvrage de 1967, *The Ghost in the Machine* [Koe13].

2. Ce néologisme introduit par A. Koestler, est dérivé du terme grec ancien ὅλος / hólos signifiant entier, augmenté du suffixe 'on' signifiant une partie de (comme dans proton, neutron, électron)

Arthur Koestler apporte une contribution importante à l'épistémologie, en reprenant le débat sur le dualisme du corps et de l'esprit initié par René Descartes. Sa réponse en termes d'holon et d'holarchie dépasse largement le cadre de l'architecture des systèmes artificiels ou sociotechniques que nous visons dans ce manuscrit. Nous proposons ici une adaptation de ces notions restreinte à notre cadre d'étude. Les prémisses de ces notions se trouvent dans les travaux d'Herbert Simon [Sim69] qui établit que parmi les systèmes complexes, ceux qui sont le plus aptes à évoluer sont ceux qui sont organisés hiérarchiquement et qui possèdent des formes intermédiaires stables.

Pour sortir de l'acceptation qu'une hiérarchie se réduit à une *simple* arborescence (au sens de la théorie des graphes), Arthur Koestler va entacher les nœuds de cette arborescence d'un *effet Janus*. En effet chaque nœud d'une hiérarchie est à la fois une partie subordonnée à un niveau supérieur et un tout possédant une forme d'autonomie, remettant en cause l'acceptation trop naïve que nous pourrions avoir de la notion de tout et partie.

« La première caractéristique universelle des hiérarchies est la relativité, voire l'ambiguïté, des termes « *partie* » et « *tout* » [. . .]. Une partie [. . .] désigne quelque chose de fragmentaire et d'incomplet qui n'aurait en soi aucune existence légitime. En revanche on considère un « *tout* » comme quelque chose de complet en soi et qui n'a besoin d'aucune explication. En réalité « *touts* » et « *parties* » au sens absolu n'existent nulle part [. . .] Ce que l'on rencontre ce sont des structures intermédiaires [. . .] » ([Koe13])

De cette constatation, Arthur Koestler pose l'effet Janus comme caractéristique essentielle d'une hiérarchie :

« *Les membres d'une hiérarchie ont, comme le dieu Janus, deux faces qui regardent en sens opposés : la face tournée vers le niveau inférieur est celle d'un tout autonome ; la face tournée vers le haut, celle d'une partie subordonnée* » ([Koe13]).

À rapprocher du constat de Pascal : « *Je ne peux pas comprendre le tout si je ne connais pas les parties, et je ne peux pas comprendre les parties si je ne connais pas le tout.* » (Blaise Pascal (1623..1662))

Le terme d'holon est introduit pour nommer un tel nœud dans une structure hiérarchique. A. Koestler énonce un certain nombre de principes holonymiques, mais son étude porte essentiellement sur les systèmes sociologiques.

En architecture, une dissection holonique d'un ensemble, d'un système (partition en des sous-ensembles autonome et à forte cohésion) doit impérativement s'accomplir suivant un principe intégrateur de ces holons pour participer du tout. Tentons d'énoncer quelques principes initiaux qui permettraient d'opérer et spécifier une partition holonique de la forme.

En tant que partie :

- quelles sont les *forces* (principes, règles) de cohésion des parties entre elles ?
- qu'est que chaque partie, qui est également un tout, a abandonné comme liberté (ou caractéristiques) au profit de la communauté des parties au sein d'un tout (son comportement est forcément bridé, restreint par la présence d'autrui) ?
- qu'est que chaque partie laisse *voir* d'elle-même aux autres parties, au tout ?

En tant que tout :

- quel contrôle (pilotage, commande) le tout exerce-t-il sur ses parties ?
- de manière complémentaire, quel degré d'autonomie laisse-t-il à ses différentes parties ?

B.1.4 Synthèse sur la structure de la forme

Les principes holoniques devrait permettre d'appréhender les différentes échelles dans un système complexe, et correctement étager le passage du local au global. Couplé à :

- la loi de la variété requise d'Ashby³ que l'on peut énoncer de manière triviale en « *Pour simplifier un système complexe, il faut lui adjoindre un autre système au moins aussi complexe* » ;
- un modèle de l'organisation dans la complexité. Nous suggérons d'adopter le modèle OID (Opération – Information – Décision) promu par J.L. Le Moigne [LM90], mais d'autres peuvent convenir ;

ces trois principes devraient nous donner les clés pour affronter et maîtriser la complexité de nos systèmes artificiels.

Dans le monde des systèmes artificiels complexes, deux visions (au moins !) de la structure de la forme coexistent :

- une vision 3P, qui amène a minima à énumérer l'ensemble des produits, personnes et procédures constitutives d'un système. Un arbre produit participe de cette approche ;
- une vision plus abstraite, qui appréhende un système comme un ensemble de (sous-)systèmes entremêlés (nous pourrions presque dire *tissés* ou *imbriqués* pour reprendre l'étymologie du mot *complexe*). Cette dernière vision appelle à une approche holarchique de la forme d'un système.

B.2 Liens et relations

Jusqu'ici, nous nous étions contentés d'affirmer que les éléments constitutifs d'un système sont reliés entre eux. Examinons cela d'un peu plus près et distinguons la notion de lien de celle de relation.

B.2.1 Lien

Un lien permet la liaison d'un élément avec un autre, ce qui les réunit, les couple entre eux ou leur permet d'échanger. Dans notre contexte de la forme, cela se traduit par « *un lien reliant deux éléments constitutifs de la forme* ». Ce lien s'incarne lui aussi en quelque chose : quelle est la nature de ce quelque chose ? La réponse peut paraître déconcertante, mais elle est identique à la nature possible des éléments constitutifs, c'est-à-dire 3P ! :

- produit : le lien peut être physique (mécanique, thermique, électrique, radiofréquence, etc.) ou logiciel, faire appel à un service (par exemple au travers d'un opérateur téléphonique pour communiquer entre deux éléments) ;
- personne : le lien peut reposer sur le rôle d'une personne (par exemple un médiateur, un huissier, un interprète, etc.) ou d'une organisation ;
- procédure (ou processus, ou protocole) : le lien peut constituer un certain nombre de règles, procédures, comme par exemple un contrat entre deux entités.

3. Pour qu'un système A puisse contrôler, c.-à-d. surveiller et commander, un système B, il faut que sa variété soit égale ou supérieure à celle de B.

Certains liens peuvent également avoir une nature hybride : souvent par exemple un lien de nature humaine s'accompagne d'un aspect procédural (un huissier, un secrétaire suivent un protocole pour établir le lien entre deux entités ; un fournisseur suit les termes d'un contrat pour établir le lien avec son client). Ces liens sont matérialisés par exemple par une IHM (Interface Homme Machine) qui se compose de produits logiciels, matériels ainsi que de procédures ou processus ; un lien informatique entre deux applications distantes se traduit à la fois par un lien physique (un câble ou un réseau véhiculant un signal électrique), un lien informationnel (des données sont échangées grâce au lien physique) et des aspects protocolaires.

Certains liens ne font que relier les éléments entre eux (une rotule par exemple est un lien mécanique entre deux pièces en mouvement), mais souvent ils sont les vecteurs d'échanges ou d'interaction entre ces éléments, ces échanges pouvant être mono ou bidirectionnels. Citons également le cas de liens qui empêchent ou filtrent, atténuent, modifient, adaptent les échanges dans un ou les deux sens. Leur fonction n'est alors pas uniquement de relier les éléments entre eux, mais aussi de les isoler entre eux sur un aspect donné (mécanique, thermique, physique, etc.), ou de permettre une adaptation d'un élément sur l'autre. Par exemple, dans les architectures informatiques sécurisées, certains liens isolent et empêchent, ou filtrent, les communications entre deux zones, dans un sens ou dans les deux sens. Autre exemple : le lien qui relie un ordinateur personnel au réseau électrique domestique comprend une fonction d'adaptation incarnée par un transformateur qui transforme du 220 V alternatif en une tension continue de l'ordre de 20 V.

Du coup il apparaît que la distinction entre éléments constitutifs d'une part, et liens d'autre part, n'est pas si franche que cela, un lien pouvant lui-même être raffiné en une structure comprenant des organes et des liens. Pour reprendre l'exemple du lien entre ordinateur et réseau électrique, il est lui-même constitué d'un transformateur, de câbles, et de prises mâle et femelle.

S'il est aisé d'exprimer l'aspect structurel d'une forme sous forme d'éléments constitutifs et de liens entre eux, il est toutefois délicat d'en donner une approche canonique. Gardons cependant en mémoire qu'au-delà de la représentation papier ou numérique, à la fois éléments constitutifs et liens s'incarnent ! Ce qui veut dire que l'arbre produit complet (ou l'organigramme complet) ne se déduit pas uniquement de la connaissance complète des éléments constitutifs d'un système, mais de la structure de ces éléments constitutifs, c.-à-d. à la fois la connaissance des éléments constitutifs et la manière dont ils sont reliés entre eux par des liens. La vision naïve et réductrice, malheureusement trop fréquente, qui consiste à dire que l'arbre produit se déduit à partir des feuilles d'une décomposition hiérarchique système est donc erronée.

L'enseignement capital à retenir en matière de conception architecturale et plus particulièrement d'élaboration de la forme est qu'éléments ET liens se conçoivent et s'incarnent, et que leur catégorisation (élément ou lien) peut relever de l'arbitraire et du choix situé de l'architecte.

B.2.2 Relation

Une relation entre deux choses indique qu'il existe un rapport, une dépendance entre ces deux choses, mais qui ne s'incarne pas forcément en un lien au sens précédent.

Par exemple une relation telle « *est géographiquement éloigné de* » peut revêtir de l'importance dans une solution architecturale d'un système. Supposons que pour des raisons de fiabilité, il soit décidé de redonder l'onduleur électrique contribuant à une alimentation ininterrompue : pour éviter des propagations de pannes d'un des onduleurs sur l'autre (par exemple un incendie sur un des onduleurs pourrait se propager sur le second) ou des modes de panne commune, il est souhaitable de déployer ces deux onduleurs en des endroits différents et suffisamment séparés géographiquement.

La connaissance et la maîtrise des relations entre les différents éléments constitutifs participent de la forme et influe sur les émergences de cette forme (son comportement émergent). L'identification et la détermination de ces relations provient le plus fréquemment de la prise en compte d'aspects transverses dans le système : sécurité, sûreté de fonctionnement, soutien logistique intégré, etc.

Annexe C

Description d'architecture

Différents modalités et cadres s'offrent à nous pour représenter et décrire des architectures. Avec l'intérêt croissant pour l'architecture des systèmes (architecting), la description d'architecture est devenu un point d'intérêt focal du domaine¹, presque au détriment des autres aspects tout aussi important, voire plus, de l'architecture, entraînant parfois l'assentiment que le travail de l'architecte se réduisait à un travail de production documentaire. Nous pensons pour notre part, que si la documentation de l'architecture au travers de descriptions (standardisées ou non, conformes à des cadres ou non) est importante pour le partage avec les différentes parties prenantes impliquées, elle ne constitue pas le cœur du travail de l'architecte, à savoir la conception architecturale. C'est pourquoi à la fois nous consacrons un chapitre à cette tâche de description d'architecture, et à la fois nous le reléguons en annexe.

Sommaire

C.1 Objectifs d'une description de l'architecture	230
C.2 Comment représenter une architecture ?	231
C.3 Cadres d'architecture	235
C.4 Élargir nos modes de représentation	237

1. La première manifestation du groupe de travail 42 de l'ISO consacré justement à ce domaine de l'architecture des systèmes a été de produire un standard sur la description d'architecture, le standard ISO/IEC/IEEE 42010 en 2011 [ISO11]

C.1 Objectifs d'une description de l'architecture

Nous pouvons dégager trois objectifs principaux d'une description d'architecture :

- offrir un support de représentation ;
- offrir un support pour le partage d'une connaissance² ;
- offrir un support pour convaincre des parties prenantes.

Une description d'architecture doit révéler l'orientation prise, les grandes idées, les principes qui, par la suite, dirigeront l'ingénierie, l'industrialisation, les opérations, et non les détails. Elle ne vise ni la cohérence ni la complétude (au contraire des représentations en ingénierie système). Plus précisément, une description d'architecture doit donner à voir sur le comment, les points clés, et les points critiques, qui vont être établis suivant certaines perspectives comme :

- les aspects programmatiques ou liés au domaine d'affaire de l'entreprise,
- les aspects capacitaires ou services,
- les aspects opérationnels,
- tout autre aspect spécifique d'intérêt pour l'opportunité considérée (par exemple : le facteur humain, les menaces et les vulnérabilités, la sécurité ...),

La description de l'architecture ne saurait se borner à une représentation (graphique ou non) des éléments constitutifs, mais gagnera à être explicitée au travers soit de scénarios illustrant les concepts opérationnels, d'emploi ou d'usage, soit de principes, règles ou concepts structurant les diverses fonctions à venir (ingénierie, production, opération...), soit de vues synthétiques ou vues d'artistes, et ce suivant diverses modalités : graphique, schématique, diagrammatique, textuelle, vidéo...

Rappelons-nous également que dans la mesure où une conception architecturale vise à proposer un ou des futurs possibles par rapport à la perception d'un existant, toute description architecturale se doit donc de comporter à la fois la perception du présent et les propositions de futurs. Plusieurs approches peuvent permettre d'exposer ces futurs hypothétiques :

- dans l'absolu, en décrivant l'état futur (indépendamment de l'état présent),
- en relatif, en indiquant les différences avec l'état présent l'état futur apparaissant donc en différentiel par rapport à l'état présent),
- en évolution continue, en explicitant la suite de transformations à appliquer à l'état présent afin d'aboutir à l'état futur.

Une description de la solution architecturale est nécessaire pour expliquer à quoi elle pourrait ressembler, comment nous pourrions l'atteindre (la transition du *as is* vers le *to be*), et comment elle pourrait évoluer (comment elle réagit face à des changements). Partager une telle explication avec les différentes parties prenantes est indispensable pour obtenir leur implication et leur adhésion dans la co-construction de la solution architecturale. Cependant, comme vu précédemment, leurs attentes, leurs motivations, leurs enjeux

2. Ici dans son sens courant, et non dans son sens épistémologique. Les descriptions d'architecture ne constituent pas formellement, ou *a priori*, une *connaissance*.

diffèrent potentiellement. De plus, leur connaissance du domaine, de l'opportunité, n'est pas forcément équivalente, et les diverses parties prenantes ont souvent recours à un jargon spécifique, s'appuyant sur un langage plus vernaculaire que véhiculaire.

Chaque partie prenante ou groupe attend des informations particulières sur le traitement de l'opportunité (à la fois en termes de contenu et de niveau d'abstraction). Chacune se pose des questions auxquelles la description de l'architecture devra tenter de répondre, du genre :

- Pour la communauté de l'ingénierie : comment cela marche ? De quoi est-ce composé ? Comment les éléments sont-ils interconnectés ? Quels sont les leviers sur lesquels je peux agir ?
- Pour la communauté des utilisateurs : Comment l'opérer ? En quoi cela va modifier l'organisation actuelle, les procédures opérationnelles actuelles ? Combien cela consomme ?
- Pour la communauté du client ou des sponsors : Combien cela va coûter ? Quels services ou capacités seront fournis ? À quel horizon ?

C.2 Comment représenter une architecture ?

Il est clair que fournir un point de vue unique sur l'architecture est voué à l'échec. Au contraire, l'architecture se doit d'être décrite au travers d'un ensemble de vues et de points de vue. La figure C.1, extraite de la norme ISO/IEC/IEEE 42010 :2011 [ISO11], résume ces concepts : une description d'architecture exprime une architecture ; elle est composée d'un ensemble de vues d'architecture, une production exprimant l'architecture sous la perspective d'une préoccupation particulière ; une préoccupation est l'intérêt témoigné par une ou plusieurs parties prenantes vis-à-vis de l'opportunité. Depuis un certain temps, cette description d'architecture a été standardisée au travers de divers cadres d'architectures(cf. annexe C.3 page 235).

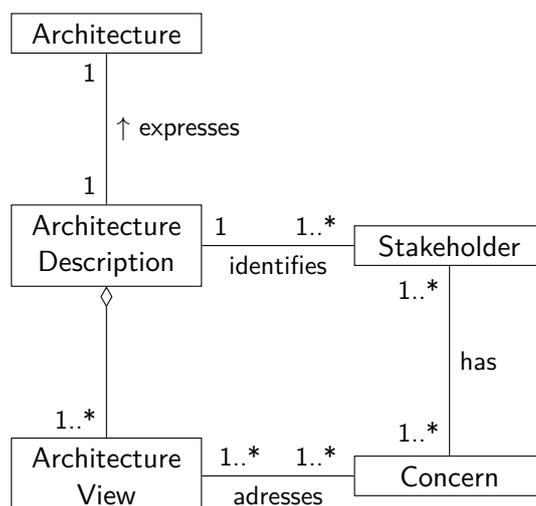


Figure C.1: La description de l'architecture d'après [ISO11] (version simplifiée)

Dans le champ de l'architecture *classique*, c.-à-d. architecture en bâtiment, la représentation est portée par un fondement scientifique : la géométrie, et quelques principes structurants dont les notions de proportion et de projection. Quelques théorèmes fondamentaux, dont celui de Thalès, arment le dessinateur

d'outils précis et scientifiquement viable. Dans le domaine qui nous préoccupe, il n'existe pas de science de la représentation, pas de *géométrie* des systèmes artificiels complexes. Les *connaissances*³ et outils mobilisables tiennent en :

- les différents langages de représentation (dit langage de modélisation), plus ou moins formels, avec une diversité de modalité (e.g. iconographique, schématique, mathématiques, textuel, hybride. . .)
- des approches de formalisation (e.g. orientée fonctions, orientée objets. . .)
- des cadres d'architectures, c.-à-d. des spécifications de catégorisation de l'information descriptive d'une architecture.

Dans notre champ d'investigation, nous ne prétendons pas poser un socle scientifique ou mathématique, bref nous ne proposerons pas une théorie de la représentation architecturale. Pour se faire, il faudrait a minima disposer d'une ontologie de la forme (et des concepts que nous avons introduits pour définir une architecture, mais surtout de la forme), nos travaux n'en proposant qu'une esquisse. En revanche, il nous semble que nous pouvons énoncer un certain nombre de principes permettant de penser et de raisonner dans le cadre d'une activité de description architecturale. L'analyse de divers modes et modalités de représentation usuels nous amène à induire les principes suivants régissant les mécanismes de représentation architecturale :

- principe d'abstraction ;
- principe de raffinement ;
- principe de filtrage ;
- principe partitif ;
- principe restrictif ;
- et, un principe cartographique.

Vu le grand nombre d'organes, et par conséquent de liens qui peuvent entrer dans la composition d'un système, il est malcommode, voire illusoire, de penser raisonner à plat en embrassant la totalité des organes et liens. La complication, et encore moins la complexité ne se maîtrisent pas en adoptant une posture extensionnelle. Au contraire, l'adoption d'un des outils intellectuels basiques de la pensée système (systems thinking), l'abstraction, permet d'affronter la complexité sans pour autant la mutiler. Cette montée en abstraction se traduit par une représentation plus simple, plus économe de la forme.



Définition C.1

[Principe d'abstraction]

Le principe d'abstraction consiste à substituer à un une représentation existante une autre représentation plus abstraite, ou à opérer une opération d'abstraction d'une image mentale ou d'un modèle. En matière de représentation, nous pouvons distinguer les différentes manières d'abstraire suivantes :

- abstraction par *simplification* (transformation) ;
- abstraction par *équivalence* (et changement de point de vue) ;
- abstraction par changement d'échelle.

3. en prenant *connaissance* dans son sens commun, et non celui philosophique ou scientifique

Réciproquement, à partir d'un niveau d'abstraction de la forme considérée, nous devons pouvoir le raffiner pour aller vers des représentations plus précises, plus détaillées, plus denses.



Définition C.2

[Principe de raffinement]

Le principe de raffinement consiste à substituer à une représentation existante une autre représentation plus détaillée. En matière de représentation, nous pouvons distinguer les différentes manières d'abstraire suivantes :

- raffinement par *complication ou décomposition* (transformation) ;
- raffinement par *équivalence* (et changement de point de vue) ;
- raffinement par changement d'échelle.

Pour palier à la diversité des informations à représenter, dont toutes n'intéressent pas forcément l'interlocuteur à qui est destinée la représentation, il convient parfois de masquer certains types d'informations, ou au contraire d'en faire ressortir plus particulièrement d'autres.



Définition C.3

[Principe de filtrage]

Le principe de filtrage consiste à filtrer (faire disparaître ou au contraire faire ressortir) certains aspects particuliers de la représentation.

Le principe partitif accompagne et complète les principes d'abstraction, de raffinement et de filtrage. Une abstraction, un raffinement ou le filtrage d'une représentation de la forme doit pouvoir s'effectuer uniquement sur une partie de la forme envisagée, tout en conservant le reste, ou une partie du reste de la représentation à son niveau de représentation initial. Cette abstraction, raffinement ou filtrage partiel supporte ainsi la mise en exergue et la focalisation d'un aspect particulier et délibéré de la forme dans son contexte. Intuitivement, pour nous pouvons comparer cela à l'utilisation d'une loupe pour regarder et faire grossir un point précis sur une carte.



Définition C.4

[Principe partitif]

Le principe partitif consiste à appliquer le principe d'abstraction ou de raffinement uniquement sur une partie (un sous-ensemble) de la représentation considérée en laissant l'autre partie (le sous-ensemble complémentaire) intacte.

Le principe restrictif accompagne et complète les principes d'abstraction, de raffinement et de filtrage. Une abstraction, un raffinement ou le filtrage d'une représentation de la forme doit pouvoir s'effectuer uniquement sur une restriction de la forme initiale, en l'isolant de son contexte. Pour reprendre la même comparaison que précédemment, celle reviendrait à sélectionner, découper et conserver qu'une partie de la carte.



Définition C.5

[Principe restrictif]

Le principe restrictif consiste à appliquer le principe d'abstraction ou de raffinement uniquement sur une partie (un sous-ensemble) de la représentation considérée en l'isolant du reste, c.-à-d. en retirant le sous-ensemble complémentaire.

Faisons le raisonnement simple suivant. Partons d'une représentation de la forme suffisamment abstraite. Elle se concrétise donc par un nombre limité d'artefacts de représentation. Supposons qu'une opération de raffinement s'applique à l'intégralité de la représentation, alors chaque raffinement successif se traduira par une inflation du nombre d'artefacts. Au bout d'un très petit nombre de raffinements répétés, la maîtrise de la forme deviendra humainement impossible [Mil56, LS87]. L'application du principe partitif ou restrictif en conjonction avec les principes de raffinement ou de filtrage permet de représenter la forme à différents niveaux de précision tout en conservant une complication constante de la représentation. Par analogie avec la géométrie différentielle, nous pourrions avancer les dénominations suivantes :



Définition C.6

[Carte locale]

Une carte locale d'une représentation de la forme F , est l'application d'un raffinement et/ou d'un filtrage sur une partition ou une restriction d'une représentation abstraite M de F .

En géométrie différentielle : Soit M une variété topologique sur un espace E de Banach. Une carte locale est une couple (U, φ) , tel que :

- U est un ouvert de M .
- φ est une application de U dans E telle que $\varphi : U \rightarrow \varphi(U)$ soit un homéomorphisme.

Soit l'analogie suivante : la partition ou la restriction d'une représentation abstraite M de F correspond à l'ouvert de M considéré, le raffinement et/ou le filtrage correspond à l'application homéomorphique. Notons qu'il s'agit d'une simple analogie de principe et non d'une équivalence, le raffinement ou le filtrage tel que définis étant loin d'avoir la qualité d'être des homeomorphismes !



Définition C.7

[Atlas]

Une famille de cartes locales d'une représentation de la forme F qui recouvre (entièrement) une représentation abstraite M de F constitue un atlas de M .

En synthèse nous pouvons ériger un principe cartographique pour la représentation d'une forme. Une forme dans le domaine de l'ingénierie des systèmes complexes et multidisciplinaires comprend par nature plusieurs aspects suivant le point de vue avec lequel nous la regardons, ou nous l'envisageons. Elle est de facto multiforme ou multidimensionnelle. En rendre compte de manière holistique n'est pas toujours aisé ou possible et amènerait à des représentations soit trop abstraites, soit trop denses de cette forme. La posture réductionniste judicieusement appliquée ici amène à considérer un certain nombre de cartes locales à partir d'une représentation abstraite de la forme, constituant potentiellement des atlas.

C.3 Cadres d'architecture

Un cadre d'architecture est une spécification sur la façon de décrire une architecture de systèmes et d'organiser cette présentation. Il définit :

- Les différents points de vue, ou niveaux pour aborder l'architecture suivant l'intérêt que l'on y porte ;
- Les différentes vues à élaborer dans chacun de ces niveaux ;
- Ce que les vues doivent contenir (le *quoi*) et non comment les élaborer (le *comment*).

Pour chacune des vues d'un cadre d'architecture, le formalisme n'est généralement pas imposé. Il peut revêtir les formes suivantes :

- Un texte (n'oublions pas que la langue française, comme la langue anglaise, offre plus de 30 000 substantifs différents, ce qui permet une certaine richesse dans l'expression tout de même !);
- Un tableau ;
- Un dessin libre dans certains cas ;
- Un schéma ou diagramme en ayant recours à des notations iconiques (UML, SysML, IDEF, BPMN...);
- Un schéma ou diagramme en ayant recours à des recours à des ADLs.

Le cadre de Zachman (*Zachman Framework*) est souvent considéré comme l'ancêtre des cadres d'architectures. Il comprend cinq niveaux, chaque niveau ayant 6 vues, répondant aux questions : « *Quoi ?* », « *Comment ?* », « *Où ?* », « *Qui ?* », « *Quand ?* » et « *Pourquoi ?* » [Zac87, ZS92, Zac97]. Depuis, de nombreux cadres lui ont succédé : DoDAF (US DoD), MoDAF (UK MoD), NAF (OTAN) AGATE (Ministère de la Défense français - abandonné et remplacé par NAF), DNDAF (Canadian DND), DAF (Australian DoD), EAEA (European ATM Enterprise Architecture, basé sur le NAF), ESAAF (ESA Architecture Framework, basé sur le MoDAF), TOGAF (The Open Group Architecture Framework, développé par le forum des architectures de l'Open Group), etc.

De même que dans le bâtiment un architecte se concentre sur la conception et l'élaboration de l'architecture, puis sous-traite la réalisation de plans normés à ses équipes de dessinateurs, dans le domaine système, un architecte devrait se concentrer sur la conception architecturale, dotant sa solution de bonnes propriétés, en les maîtrisant dans la durée du cycle de vie du système, et se reposer sur des dessinateurs pour élaborer et entretenir les diverses descriptions de l'architecture. Tout au plus, comme son collègue du bâtiment, devrait-il s'impliquer dans la pédagogie et l'explication *au bon niveau* de l'architecture, en fonction des parties prenantes (vers son client, vers ses équipes).

	Behaviour								
	Classification	Structure	Connectivity	Processes	States	Sequences	Information	Constraints	Programme
Enterprise	E1 Capability Taxonomy NAV-2, NCV-2 AV-2, SV-2	E2 Enterprise Vision NCV-1 SV-1	E3 Capability Dependencies NCV-4 SV-4	E4 Standard Processes NCV-6 SV-6	E5 Effects		E7 Performance Parameters NCV-1 SV-1	E8 Planning Assumptions	Ep Capability Phasing NCV-3 SV-3
Service	S1 Service Taxonomy NAV-2, NSOV-1 AV-2, SV-1		S3 Service Interfaces NSOV-2 SOV-2	S4 Service Functions NSOV-3 SOV-3	S5 Service States NSOV-4b SOV-4b	S6 Service Interactions NSOV-4c SOV-4c	S7 Service I/F Parameters NSOV-2 SOV-2	S8 Service Policy NSOV-4a SOV-4a	Sp Service Delivery
Logical	L1 Node Types NAV-2 AV-2	L2 Logical Scenario NOV-2 OV-2	L3 Node Interactions NOV-2, NOV-3 OV-2, OV-3	L4 Logical Activities NOV-5 OV-5	L5 Logical States NOV-5b OV-5b	L6 Logical Sequence NOV-5c OV-5c	L7 Logical Data Model NOV-11a OV-7	L8 Logical Constraints NOV-6a OV-6a	Lp Lines of Development NPV-2 ACV-2
Resources	R1 Resource Types NAV-2, NSV-9 AV-2, SV-9	R2 Resource Structure NOV-4, NOV-1 OV-4, SV-1	R3 Resource Connectivity NSV-3, NSV-4 SV-2, SV-6	R4 Resource Functions NOV-4 SV-4	R5 Resource States NSV-10b SV-10b	R6 Resource Sequence NSV-10c SV-10c	R7 Physical Data Model NOV-11b SV-11	R8 Resource Constraints NOV-10a SV-10a	Rp Configuration Management NSV-8 SV-8
Deployed	D1 Master Data NAV-2 AV-2	D2 Deployed Resources NCV-5, NOV-4 SV-5, OV-4							Dp Deployment Schedule NCV-5 SV-5
Architecture	A1 Meta-Data Definitions NAV-1/2 AV-1/2	A2 Architecture Products	A3 Architecture Correspondance ISO42010	A4 Methodology Used NAF CH3	A5 Architecture Status NAV-1 AV-1	A6 Architecture Versions NAV-1 AV-1	A7 Architecture Meta-Data NAV-1/3 AV-1	A8 Standards NTV-1/2 TV-1/2	Ap Architecture Plan

Figure C.2: Les différentes vues du NAF V4.0

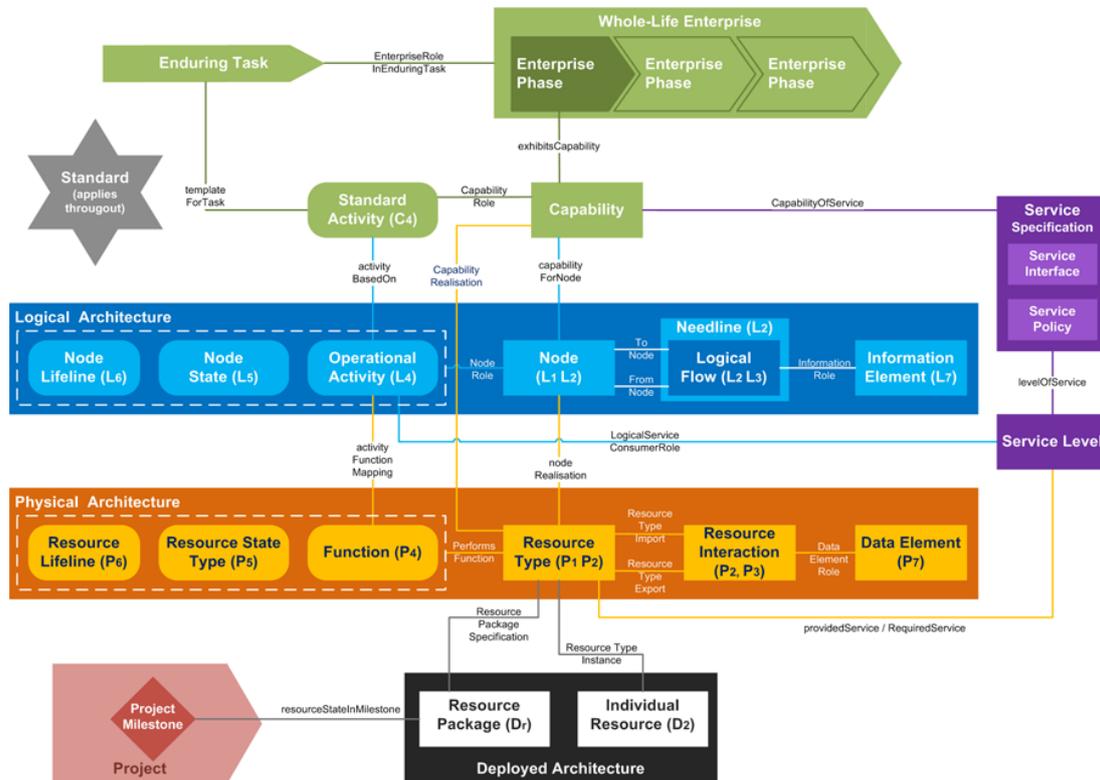


Figure C.3: Méta modèle simplifié du NAF V4.0

C.4 Élargir nos modes de représentation

Dans un article [LMW15] nous avons constaté que les modes de représentation actuels de l'architecture étaient encore restreints, et noté un certain nombre de faiblesses ou manques dans ces modes. En voici un résumé :

- difficulté à exprimer le concept (comment passons-nous de la *fonction* à la *forme*?) autrement que par des tables d'allocation fonction \times forme ;
- difficulté à se sortir de visions trop techniques (centrées sur la fonction et la forme) qui ne parlent pas forcément à toutes les parties prenantes (qui préféreraient sans doute que nous ayons une approche centrée sur la valeur, et exposions les bénéfices et coûts de nos propositions) ;
- difficulté à exprimer la multiplicité des alternatives d'architecture possibles. Trop souvent la description se contente d'être une représentation plus ou moins figurative d'une proposition, mais ne propose pas un niveau abstrait qui exposerait l'ensemble ou l'espace des solutions. Les travaux de B. Koo [Koo05] avancent l'idée d'établir un métalangage de l'architecture pour atteindre cet objectif (il proposera OPN – *Object-Process Network* – un tel métalangage) ;
- difficulté à exprimer l'aspect dynamique (la forme est susceptible d'évoluer dans le temps) ;
- difficulté à exposer les différentes décisions prises et leurs impacts sur l'architecture.

L'idée centrale que nous avons développé pour élargir les modes était le dualisme [LMW15], qui consistait à proposer des modes de représentations en dialogique ou en complémentarité. Nous en faisons ici une synthèse.

Complétude et clarté

D. Dori exprime cette complémentarité et cette contradiction dans son ouvrage [Dor02] : "Completeness means that the system must be specified to the last relevant detail. Clarity means that to communicate the analysis and design outcomes, the documentation, be it textual or diagrammatic, must be legible and comprehensible." La traduction de cette contradiction pourrait tenir en : « *tuilage versus raffinement* ». Le tuilage est probablement l'approche la plus classique de nos jours. Les cadres d'architectures (cf. annexe C.3 page 235) en sont un exemple manifeste, de même que l'approche SySML, ou Arcadia [Voi18]. Dans ce type d'approche, la clarté est obtenue par réductionnisme, la complétude par le tuilage des différentes vues, diagrammes ou perspectives.

Diagramme et littérature

Avec la popularité croissante du MBSE (*Model-Based Systems Engineering*), une confusion a pu s'installer, réduisant l'activité de modélisation à la production de diagrammes. Rappelons-nous qu'un modèle est une abstraction de notre monde nous permettant de raisonner sur des aspects spécifiques (« *Nous ne raisonnons que sur des modèles* », *Paul Valéry*). Les diagrammes sont une modalité, parmi d'autres. Pendant des siècles, le support universel pour raisonner sur le monde a été le langage naturel et le langage mathématiques (les deux à être utilisé de manière quasi exclusive par les philosophes).

Nous soutenons fréquemment qu'un dessin vaut mieux que des milliers de mots. En fait, un diagramme spatialise l'information (elles sont placées géométriquement), un texte sérialise l'information. Cette différence notable et ses conséquences en termes de cognition ont été étudiées par J. Larkin et H. Simon [LS87]. En sérialisant l'information

(nous devons *raconter* une histoire), nous mettons en exergue un ordre particulier, et ce faisant nous révélons une structure qui est découverte au fur et à mesure. Cela implique, qu'en tant qu'auteur, ce travail de structuration a été clairement établi.

Le placement d'une information à côté d'une autre donne au diagramme sa lisibilité, et influe sur la manière de naviguer et de chercher de l'information. Néanmoins, à part pour les représentations géométriques avec une échelle, changer le placement d'un élément dans un diagramme ne change pas la sémantique pour autant, alors que changer l'ordre dans un texte change résolument sa sémantique. Généralement, les modèles diagrammatiques s'appuient sur quelques concepts (le vocabulaire défini), réduisant la capacité d'expression (mais généralement gagnant en clarté), alors qu'un texte écrit dans un langage comme le Français ou l'Anglais bénéficie d'un vocabulaire riche de plus de 30 000 substantifs.

Géographie et
Histoire

F. Braudel, un historien célèbre du 20^e siècle, posa que nous ne pouvons pas comprendre la géographie d'un pays si nous n'en connaissons pas l'histoire. Il est ainsi à l'origine du néologisme : *géohistoire*. Quand nous décrivons des architectures, nous avons tendance à favoriser une approche *géographique*, qui établit des photos à des instants précis (ou non) des constituants et leurs relations. Ce type d'approche permet de voir l'agencement des constituants entre eux, de connaître, grâce à la traçabilité ou aux mécanismes d'allocation, « *que font-ils ?* », mais pas « *pourquoi ils sont là ?* » et « *comment ils y sont arrivés ?* ». Une approche historique, enregistrant et relatant les différentes décisions prises, les choix effectués, relaterait ces informations et augmenterait ainsi la compréhension des architectures.

Intentionnel et
Extensionnel

Les descriptions d'architecture sont presque exclusivement produites en adoptant une posture extensionnelle : elles sont représentées au travers de l'énumération (complète ?) des constituants. Une approche intentionnelle poserait les règles ou les principes auxquels ces constituants doivent obéir. Une telle description intentionnelle devrait posséder les *bonnes* propriétés suivantes :

- nécessaire (nous ne pouvons pas enlever de règles ou de principes de l'énoncé, à moins de définir une nouvelle architecture) ;
- suffisante (il n'est pas nécessaire d'ajouter d'autres règles ou principes, à moins de définir une nouvelle architecture).

Remarquons au passage que cette description d'une *bonne* description intentionnelle est elle-même intentionnelle.

Nous retrouvons là la différence dans la définition d'un ensemble : en extension ($\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$) ou en compréhension ($\{n \in \mathbb{N} \mid n < 10\}$). Notons que la définition en compréhension passe à l'échelle : l'ensemble des 100 premiers entiers naturels s'écrirait de manière aussi économe, alors que l'écriture en extension subirait une inflation notable.

Annexe D

Analyses lexicographique et sémantique

Cette annexe comprend pour quelques concepts clés :

- *une étude lexicographique des termes basé sur les ressources de deux dictionnaires*
 - *le Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition,*
 - *le Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française ;*
- *des atlas sémantiques réalisés grâce à l'outil Atlas Sémantiques [At18b] à partir, entre autres, des travaux suivants : [PV98]. « Les Atlas sémantiques sont un modèle de représentation géométrique du sens des mots testé pour sa pertinence cognitive. » ([At18a]). Ces atlas ont été réalisés pour le substantif du concept en langue Française, et simultanément pour sa traduction en langue Anglaise.*

Sommaire

D.1	Systeme	240
D.2	Architecture	246
D.3	Conception	250
D.4	Contexte	253
D.5	But	256
D.6	Capacité	259
D.7	Forme	263
D.8	Comportement	269
D.9	Concept	272

D.1 Système

Lexicographie

Encart D.1

[Système (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 8^e édition](Entrée absente de la 9^e édition.) Ensemble de propositions, de principes vrais ou faux mis dans un certain ordre et enchaînés ensemble, de manière à en tirer des conséquences et à s'en servir pour établir une opinion, une doctrine, un dogme, etc. *Le système astronomique de Ptolémée. Le système de Copernic. Le système de Law. Former, composer un système. Défendre, soutenir, combattre, renverser un système.* On le dit souvent en mauvaise part. *Il a imaginé, il a fait, il a bâti un nouveau système. Il faut se défendre de l'esprit de système.* En termes d'Histoire naturelle, il se dit d'une Distribution méthodique et artificielle des êtres, propre à en faciliter l'étude. *Le système de Linné.* Il signifie aussi, dans plusieurs Sciences, Ensemble d'éléments divers formant un tout dont toutes les parties sont liées. *Le système solaire. Le système nerveux, musculaire, sanguin.* On dit dans un sens analogue, en parlant de la Constitution des États : *Système féodal, système représentatif, système fédéral, etc.* *Le système métrique,* L'ensemble des mesures qui ont le mètre pour base commune.

SYSTÈME se dit, dans le langage ordinaire, du Plan qu'on se fait et des moyens qu'on se propose d'employer pour réussir en quelque chose. *Système de conduite. Système de gouvernement. Il faut suivre tout un autre système. Il faut changer de système. Cet homme tient beaucoup à son système. Il sacrifie tout à son système, sans considérer les conséquences. Je n'entends rien à son système.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

A.–

1. Construction de l'esprit, ensemble de propositions, de principes et de conclusions, qui forment un corps de doctrine ; en partic., hist. des sc., construction théorique cohérente, qui rend compte d'un vaste ensemble de phénomènes. *Système astronomique, philosophique ; construire, échafauder des systèmes ; défendre, soutenir, suivre un système ; combattre, renverser un système ; la cohérence d'un système ; la clé d'un système. Un système est une doctrine absolument personnelle à celui qui l'invente. Si elle contredit toutes les autres, le système est mauvais ; si elle les illumine, il est bon, au moins comme système* (Joubert, *Pensées*, t. 1, 1824, p. 327). *La science (...) est (...) un système de connaissances démontrées, liées entre elles en une unité idéale, abstraite, indépendante des objets concrets* (Massis, *Jugements*, 1923, p. 64).

◆ **Système de** + n. propre. *Le système d'Aristote, de Gassendi, de Kant, de Newton.* [...]

◆ **Système clos.** Ensemble fermé d'éléments ou de relations, soustraits à toute autre influence que celle qu'ils ont les uns sur les autres. [...]

2. HIST. NAT. Méthode de classification fondée sur l'emploi d'un nombre restreint de critères ; p. méton., classification qui en résulte. Synon. *taxinomie. Le système de Linné.*

B.– Ensemble structuré d'éléments abstraits, ensemble de concepts présentés sous une forme ordonnée. *Système notionnel ; système de concepts, d'idées, de lois, de notions, de relations, de valeurs ; système de pratiques, d'habitudes ; ériger (qqc.) en système.* [...]

1. LOG. **Système formel.** Système composé d'un vocabulaire, d'un ensemble d'axiomes

et d'un ensemble de règles de déductions. [...]

2. Ensemble de définitions, de conventions et de règles coordonnées logiquement

a) MATH., ALG. Ensemble. *Des nombres entiers ou des systèmes finis ou infinis de nombres entiers, reliés entre eux par un réseau de relations d'égalité ou d'inégalité* (H. POINCARÉ, *Valeur sc.*, 1905, p. 19).

◆ *Système d'équations.* Ensemble de plusieurs équations devant être satisfaites simultanément. *Système d'équations linéaires, algébriques; système d'équations différentielles; système indéterminé. La détermination complète du système d'équations définissant l'équilibre* (*Univers écon. et soc.*, 1960, p. 30-5).

◆ *Système de relations.* Ensemble de relations qui doivent être satisfaites simultanément (*Math.* 1967-69). [...]

◆ *Système de vecteurs.* Ensemble composé d'un nombre fini de vecteurs mobiles sur leur ligne d'action (UV.-CHAPMAN 1956).

b) AUTOM. *Théorie des systèmes.* Recherche des propriétés générales des systèmes (contrôlabilité, stabilité, équivalence, linéarité, etc.) et développement des méthodes pour décrire certains types de systèmes (systèmes finis, systèmes à apprentissage, systèmes linéaires, etc.) (d'apr. THINÈS-LEMP. 1975). *Analyse, contrôle, synthèse des systèmes; systèmes optimaux.*

c) PHYS., SC. *Système (d'unités).* Ensemble coordonné d'unités servant à la mesure des différentes grandeurs. *Système électromagnétique. Système U.E.S.C.G.S., système U.E.M.C.G.S., système MKS* (*Sc.* 1962).

◆ *Système International d'Unités (SI).* Système de mesure officiel en France depuis 1962, qui prolonge le système MKSA par l'adjonction du degré Kelvin et de la Candela. *Un système cohérent d'unités mécaniques et électriques qui est à l'origine de l'actuel Système International d'unités (SI)* (SARM., *Phys.*, 1981, s.v. *giorgi*).

◆ *Système MKSA.* Système de mesure dont les unités fondamentales sont le mètre, le kilogramme, la seconde et l'ampère (KAMEN. 1972).

◆ *Système d'unités absolues.* Système d'unités physiques fondé sur l'emploi d'un nombre minimum d'unités fondamentales indépendantes, choisies de façon à réduire à l'unité les coefficients numériques figurant dans certaines formules physiques très importantes, choisies comme fondamentales (d'apr. UV.-CHAPMAN 1956). *Jusqu'à ces dernières années, le système d'unités absolues le plus répandu était le système CGS, basé sur le centimètre, le gramme-masse et la seconde* (PIR. 1964).

◆ *Système métrique.*

d) PHYS., MÉCAN. Ensemble. Systèmes mécaniques. [...]

α) *Système de forces.* [...]

β) *En partic.* Ensemble d'éléments servant de référence. [...]

– MATH., MÉCAN., ASTRO. [...]

◆ *Système d'axe(s).* [...]

◆ *Système de numération.* [...]

◆ *Système galiléen.* [...]

– PHYS. NUCL. [...]

◆ *Système du centre de gravité.* [...] *Système du laboratoire.* [...]

◆ *Système absolu.* [...]

– ASTRO. *Système galactique.* [...]

3. MINÉR., CHIM., CRISTALLOGR. *Système cristallin.* [...] *Système cubique.* [...] *Système orthorhombique.* [...]

4. Ensemble ou sous-ensemble d'éléments, de symboles définis par des relations qu'ils

entretiennent entre eux.

a) Toute méthode de communication, d'écriture, de notation, régie, codifiée par des règles précises. *Système morse; le système de la mode étudié par Roland Barthes*. [...] – LING., GRAMM. *Système d'écriture*. Ensemble des symboles utilisés pour représenter le discours parlé ou pensé. *Système alphabétique, système syllabique* (PHÉL. LING. 1976). *Système idéographique*.

– [En gramm. générative] *Système de réécriture*. [...]

b) LINGUISTIQUE

α) [Chez Saussure] Ensemble d'éléments dépendant les uns des autres pour former un tout organisé. *L'équilibre du système*. [...]

β) *En partic.* [La lang. considérée comme un système de formes, de signes, de mots] Ensemble de termes, d'éléments étroitement liés entre eux à l'intérieur du système général de la langue. *Le système vocalique d'une langue; le système du nombre en français*. [...]

γ) MÉTR., VERSIF. (Mode d')agencement des strophes, des vers. [...]

c) MUS. Organisation des sons au sein d'une structure déterminée (mélodique, harmonique, rythmique), suivant un principe acoustique donné (d'apr. *Mus.* 1976). *Système diatonique; système tempéré; système de l'harmonie*. [...]

◆ *Système acoustique*. Principe acoustique dans lequel les sons s'ordonnent (d'apr. *Mus.* 1976). [...]

◆ *Système harmonique, système de composition*. Principe harmonique, principe de composition (d'apr. *Mus.* 1976). [...]

C.– Région de la matière, ensemble d'éléments naturels de même espèce ou de même fonction considérés dans leurs relations à l'intérieur d'un tout organique. *Système du monde; système solaire; système planétaire*. [...]

1. PHYS. Ensemble fonctionnel dont les parties sont interconnectées et échangent (...) de la matière, de l'énergie ou de l'information (PAUL Télédétection 1982). *Système actif, système passif* (PAUL Télédétection 1982). [...]

a) Ensemble de corps entre lesquels existent des liaisons (MATHIEU-KASTLER *Phys.* 1983). [...]

b) MÉCAN. *Système articulé*. Mécanisme constitué par un assemblage de solides dont les liaisons deux à deux peuvent : 1 Soit permettre un mouvement de rotation autour d'une droite (...) 2 Soit permettre un mouvement de rotation autour d'un point, de l'un des solides par rapport à l'autre (UV.-CHAPMAN 1956). *Système asservi*. Machine établissant une relation bien définie entre une grandeur d'entrée *E* et une grandeur de sortie *S*, de manière à imposer à *S* une valeur ou une évolution déterminées, malgré certaines influences perturbatrices aléatoires (MATHIEU-KASTLER *Phys.* 1983). *Système thermodynamique*. Ensemble des corps situés à l'intérieur d'une surface fermée (L. BOREL, *Thermodyn. et énergétique*, Lausanne, Presses polytechn. romandes, 1984, p. 2). *Système (thermodynamique) ouvert ou fermé*. [...] *Système binaire, ternaire, quaternaire*. . . Système thermodynamique formé de deux, trois, quatre. . . constituants indépendants (d'apr. MATHIEU-KASTLER *Phys.* 1983). [...]

◆ *Système matériel*. Ensemble, région, objet matériel bien déterminé(ée). (Ds FERRY-MICH. 1981).

a) Ensemble d'organes ou de tissus présentant la même structure, participant à la même fonction, constituant une entité biologique. *Système sanguin; système artériel, veineux, lymphatique, vasculaire; système digestif, ganglionnaire, immunitaire, osseux, pileux, respiratoire, sensitif; système sympathique, parasympathique; système d'éveil, de*

reproduction. [...]

◆ *Système nerveux**. Absol., fam., arg. *Courir, donner, porter, taper sur le système* (à qqn). Exaspérer (quelqu'un). [...]

b) Synon. de *appareil* (mais gén. réservé à des ensembles relationnels). *Système urinaire, système vestibulaire* (*Méd. Biol.* t. 3 1972). *Système uro-génital*. [...]

3. GÉOL. Ensemble des terrains constituant une période géologique. *Système crétacique, dévonien, jurassique, précambrien* (NOËL 1968). [...]

4. MÉTÉOR. *Système nuageux*. Groupement de nuages distinct et durable, généralement composé de plusieurs zones différenciées, assemblées d'une façon caractéristique, et dans chacune desquelles l'aspect général de l'ensemble du ciel présente des particularités marquées (d'apr. *Hydrol.* 1978). [...]

D.– Ensemble d'éléments organisés destiné à une fonction définie.

1. POL., SC. ÉCON. Ensemble de méthodes organisées, de pratiques, de procédés destinés à assurer une fonction définie.

a) **Système** + adj. *Système bancaire, communiste, démocratique, dialectique, électoral, fédéral, féodal, financier, fiscal, patriarcal, socialiste, totalitaire; systèmes et procédés comptables*. [...]

◆ *Système économique*. Ensemble cohérent d'institutions juridiques et sociales, au sein desquelles sont mis en œuvre certains moyens techniques organisés pour assurer la réalisation de l'équilibre économique (d'apr. BERN.-COLLI *Extr.* 1976). [...]

◆ *Système monétaire; système monétaire européen. Système monétaire international*. Ensemble des institutions, conventions et règles de comportement présidant aux règlements des échanges internationaux (BERN.-COLLI *Extr.* 1976). [...]

b) **Système de**. *Améliorer le système de production; le système de Law*. [...]

c) SC. ÉCON. *Analyse des systèmes*. Méthode d'analyse des ensembles complexes, comprenant des objectifs et moyens multiples, dont les uns sont complémentaires, les autres alternatifs, et qu'il s'agit d'« optimiser » (COMBE-CUSSET 1974). [...]

2. *P. ext.*

a) Principe ou ensemble de principes mis en application, moyens mis en œuvre en vue d'un résultat. *Système rigide; système des punitions et des récompenses*. [...]

◆ *Système de vie*. Principes, mode de vie. [...]

– *Locutions*

◆ *Avoir pour système (de)*. Avoir pour principe (de). [...]

◆ *Esprit de système*. Tendance à organiser les connaissances particulières en un tout cohérent (FOULQ.-ST-JEAN 1962). [...] Tendance à privilégier l'organisation théorique, les valeurs dogmatiques, en négligeant les faits réels; en partic., synon. de esprit de parti. [...]

◆ *Par système*. Sans tenir compte de la réalité; de parti pris. [...]

◆ *Sans système*. [...]

b) ARTS (en partic. en crit. artist.). Ce qui favorise l'esprit de système aux dépens de la sincérité et de l'invention personnelle de l'auteur (d'apr. BÉG. *Dessin* 1978). [...]

3. Moyen employé pour réussir. Synon. fam. *combine, truc. Il a trouvé le système*. [...]

– *Loc. Système débrouille; système D.*

– *Arg.* (École de Saint-Cyr). Ensemble des traditions sacrées de l'École (ESN. 1966).

Père Système. Élève qui, classé dernier au concours d'entrée, est immatriculé le premier de sa promotion, avec un numéro proche de ceux des anciens dont on considère qu'il connaît les traditions (d'apr. ESN. 1966).

4. Appareillage, dispositif, ensemble d'éléments assurant une fonction déterminée. *Système électronique; système émetteur-récepteur; système d'éclairage, de fermeture, de protection, de sécurité; système de commande numérique; système de contre-mesure; système de guidage, de navigation, de pilotage, de stabilisation; système de contrôle automatique, de surveillance électronique.* [...]

a) PHYS., ÉLECTRO-ACOUST.

◆ *Système acoustique.* Tout assemblage d'éléments permettant d'assurer la transmission du son (SIZ. 1968).

– ÉLECTR. *Système d'alimentation.* Accumulateur ou générateur de type compact, destiné à l'alimentation électrique des flashes et des appareils à « puissance de feu » automatique (POLLET *Phot.* 1970).

– OPT. *Système centré.* V. ce mot ex. 2. *Système optique.* Ensemble de dioptries, lentilles, miroirs, prismes... destiné à la formation d'images optique' (MATHIEU-KASTLER *Phys.* 1983).[...]

b) INFORMAT. *Système de gestion de bases de données; système de gestion intégrée. Système de programmation* (LUCA *Micro-informat.* 1984). *Système conversationnel ou système interactif.* Disposition de matériel, de logiciel, ou des deux à la fois, qui permet une intervention de l'utilisateur dans une tâche en cours d'exécution (PAUL *Téledétection* 1982). *Système de traitement numérique d'images.* Système interactif adapté au traitement d'image et à son exploitation (PAUL *Téledétection* 1982). *Système d'exploitation (d'un ordinateur).* Logiciel gérant un ordinateur, indépendant des programmes d'application mais indispensable à leur mise en œuvre (FRANTERM *Micro-informat.* 1984).

c) ARM. MILIT.

◆ *Système (d'arme).* Ensemble constitué par un projectile et les équipements nécessaires à sa mise en œuvre. *Système de (conduite de) tir, de mise à feu, de protection, de sécurité, de visée.* [...]

◆ *Fusil à système.* Variante mécanique introduite par les armuriers de l'ère artisanale, après l'abandon de la platine à silex (d'apr. DUCHARTRE 1973).

d) Dispositif de fixation.[...]

Atlas sémantique

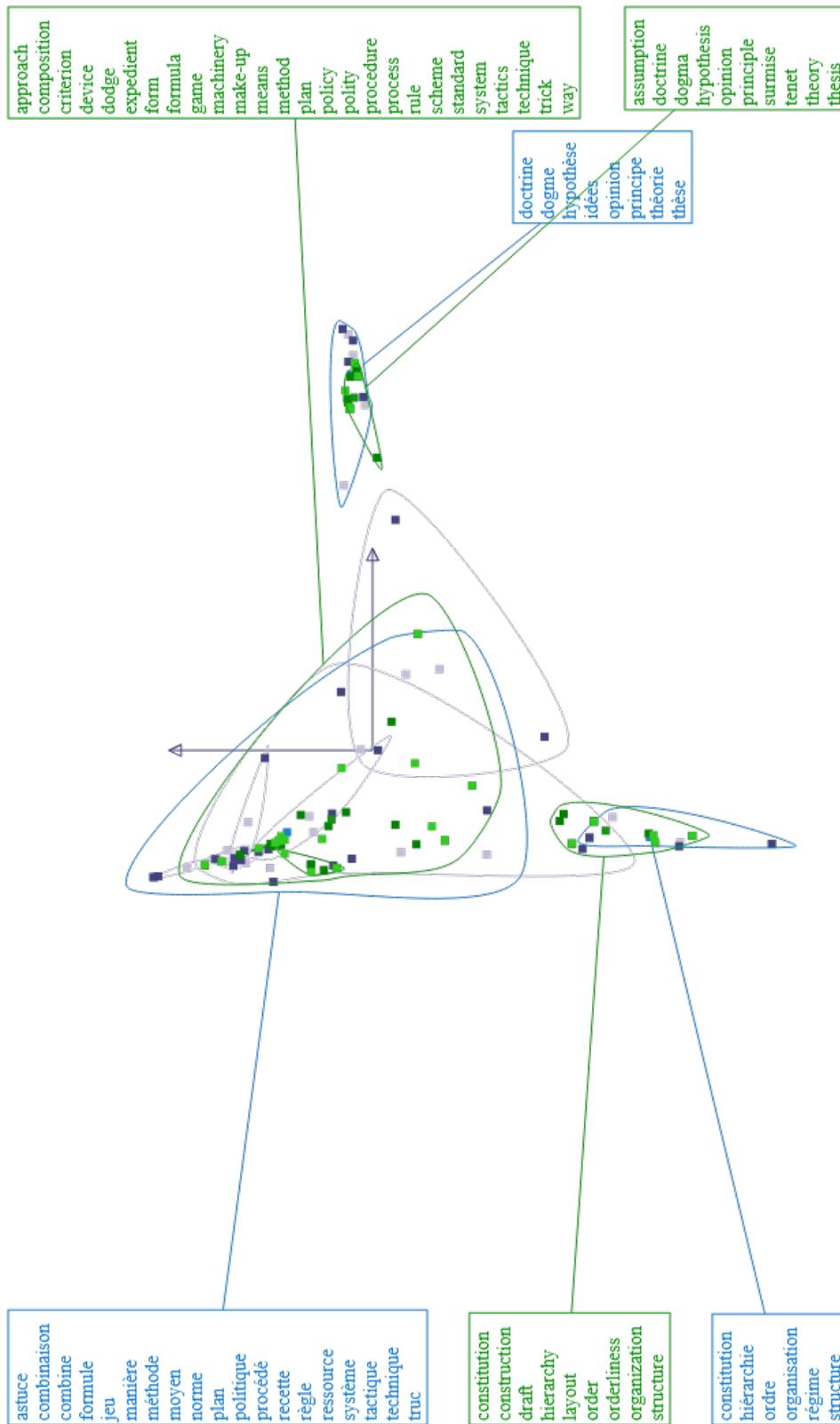


Figure D.1: Atlas sémantique pour le mot *système*

D.2 Architecture

Lexicographie

Encart D.2

[Architecture (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n. f. XV^e siècle, *archisseture*. Emprunté du latin *architectura*, « art de construire les maisons », sous l'influence de l'italien *architettura*.

☆ 1. Art de construire, de disposer et d'orner les édifices. *Architecture ancienne, moderne. Architecture grecque, romaine, byzantine, romane, baroque. La cathédrale de Chartres est un modèle d'architecture gothique. Les cinq ordres classiques d'architecture, dorique, ionique, corinthien, composite, toscan. Architecture industrielle. Architecture militaire.* Par anal. *Architecture navale*, art de construire les vaisseaux. ☆ 2. Disposition, ordonnance d'un édifice. *Voilà un bâtiment d'une belle architecture.* Par méton. Édifice. *Des architectures massives, majestueuses.* Par anal. *L'architecture d'un décor de théâtre. L'architecture du corps humain. L'architecture d'un drame.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

A.— TECHNOLOGIE

1. Art, science et technique de la construction, de la restauration, de l'aménagement des édifices :

- 1. Au vrai, l'**architecture** offre l'aspect émouvant d'une *géométrie vivante*, ce qui ne peut être obtenu qu'à condition de ne pas observer une rigueur absolue dans les distances, les *mesures* et les *proportions*. L'inscription approximative de tout *édifice* bien *construit* dans des cercles et des rectangles appartient à l'éternelle **architecture**. Il ne s'agit, quand notre instinct géométrique sait maintenir, au moins grossièrement, cette formule-là, que d'animer à sa façon les surfaces expressives, ce qui est la tâche propre de l'époque et du moment. É. FAURE, *L'Esprit des formes*, 1927, p. 169.

– *En partic.* [Avec un adj. indiquant le cadre ou la destination de la construction] *Architecture civile, hydraulique, militaire, religieuse, rurale, urbaine* ; p. anal., vx, *architecture navale*. Synon. usuel *construction navale*.

– *Spéc. Jeu d'architecture.* Jeu d'enfant constitué d'éléments destinés à être assemblés de manière à figurer divers édifices. Synon. *jeu de construction*.

2. [Le plus souvent suivi d'un adj., d'une relative, d'un compl. déterminatif,...] Mode, style de construction, caractère architectural, ordonnance d'un édifice :

- 2. ... un temple aux *proportions gigantesques*, d'une **architecture** *lourde, violente et convulsive* comme celle des œuvres du Piranèse, ... GRACQ, *Au château d'Argol*, 1938, p. 162.

SYNT. *Architecture antique, ancienne; architecture égyptienne, grecque, romane, gothique ou ogivale, de la Renaissance, classique, baroque, contemporaine, moderne; belle, noble, riche architecture; architecture simple, admirable, massive, compliquée; architecture bourgeoise, industrielle. [...]*

3. *P. méton.* Ensemble d'un édifice et de ses caractères architecturaux typiques, ou bien ses différentes parties, ou encore ses éléments d'ornementation :

●5. Et ce fut un palais, vaste, immense, confus, Une ample colonnade aux innombrables fûts. Dans ce monde peuplé d'un monde de sculptures Grinçaient les oripeaux de mille **architectures**. Banville, *Les Cariatides*, 1842, p. 98.

●6. ... peu à peu, l'*église entière* se dégagait, haute **architecture** de style jésuite. G. ROY, *Bonheur d'occasion*, 1945, p. 42.

[...]

B.– P. anal.

1. Principe d'organisation d'un ensemble, agencement, structure :

●8. Elle portait des robes d'une **architecture** très étudiée, mettant en valeur sa poitrine par un drapé exact, de ces robes sobres sans être dépouillées, dont on disait alors dans la couture qu'elles avaient du chien. ABELLIO, *Heureux les pacifiques*, 1946, p. 40.

[...]

– Au fig. :

●11. Orgueil, confiance, reprit Lélia, ce sont mots différents pour exprimer la même idée ; ce sont deux manières diverses d'envisager le même sentiment. De quelque nom que vous l'appelliez, il est le complément de notre organisation et comme la clef de voûte de notre architecture intellectuelle. G. SAND, *Lélia*, 1833, p. 168.

●12. Sous ce rapport, l'Est ainsi que l'Ouest sont poussés dans les voies de l'impérialisme, par le désajustement des formes de l'économie réelle et des formes de l'architecture politique et juridique des nations. PERROUX, *L'Écon. du XX^es.*, 1964, p. 588.

– En partic., dans le domaine des arts (*litt., mus., peint.*) :

●13. Le fond psychique imprègne la *forme*. Et le miracle de cet art est que la forme est adéquate au sentiment. Je tâcherai de le faire voir et toucher dans mes analyses de quelques œuvres, et particulièrement de l'op. 106. Si grandiose qu'en soit l'**architecture**, la solution des problèmes de *construction* ne serait qu'un jeu de techniciens et d'esthètes, si, sous ces *lignes* et ces *volumes* solidement arrêtés et agencés, le flux de la vie intérieure la plus profonde et la plus libre ne réussissait à se couler, ? si l'**architecture** musicale n'était l'étoffe qui recouvre, en s'y appliquant exactement, une âme vivante, dont les problèmes sont un jeu bien autrement grandiose. R. ROLLAND, *Beethoven*, t. 1, 1928, p. 26.

●14. Quoi qu'il en soit, notre langue, rebelle aux formations des mots composés, aux facilités d'accord, au *placement arbitraire* des mots dans la phrase (...) est justement fameuse pour la clarté de sa structure, qui (...) fit concevoir et réaliser tant des chefs-d'œuvre d'*organisation* verbale, des pages d'une perfection d'**architecture**. VALÉRY, *Regards sur le monde actuel*, 1931, p. 183.

●15. L'espace fictif de la profondeur créée par la perspective peut encore venir se combiner avec celui de la surface peinte. Les *lignes* se lironent à la fois dans l'éloignement dont elles créent l'illusion et où elles semblent courir vers l'horizon, et dans le plan de la peinture, dont elles *édifient* l'**architecture** plastique. Trompe-l'œil et composition, au lieu de se contrecarrer, viennent alors collaborer. C'est là un procédé dont le plus illustre exemple reste La Cène de Léonard de Vinci : le point de fuite coïncide avec le sujet principal, qui est la tête du Christ ; ... HUYGHE, *Dialogue avec le visible*, 1955, p. 215.

2. Ensemble structuré, organisé, construction :

●16. ... les rochers, *bâtis pêle-mêle, composent un monument* monstre ; nulle logique, un vaste équilibre. C'est plus que de la solidité, c'est de l'éternité. En même temps, c'est le désordre. Le tumulte de la vague semble avoir passé dans le granit. Un écueil, c'est de la tempête pétrifiée. Rien de plus émouvant pour l'esprit que cette farouche **architecture**, toujours croulante, toujours debout. Hugo, *Les Travailleurs de la mer*, 1866, p. 277.

– *Au fig.* :

●17. Les grandes **architectures** de la pensée ne voient pas un type nouveau s'ajouter à elles, quand même la *masse des matériaux* et le nombre des *ouvriers* s'augmentent indéfiniment. ? En se mettant au courant des recherches, on se sent gonflé de faits, mais affamé d'idées. AMIEL, *Journal intime*, 1866, p. 282.

●18. Il est bien entendu que l'Europe sans épithète est plus vaste que l'Europe des six, que des formules heureusement expérimentales d'unification valent mieux que les **architectures** abstraites, que l'Europe n'est pas un lieu mais une tâche, qu'elle n'est point un territoire mais une combinaison de grandes fonctions, (...) PERROUX, *L'Écon. du XX^{es}*, 1964, p. 398.

– *Spéc.*, FRANC-MAÇONN. *Morceau, pièce d'architecture*. Discours. *Livre d'architecture*. Registre qui contient les procès-verbaux d'une loge, (...). (A. DELVAU, *Dict. de la lang. verte*, 1867, p. 281) :

●19. Le bénédictin Pernetty, fondateur de la *loge illuminée* du faubourg Saint-Jacques, nous dicta et nous fit adopter les termes de la sommation qu'envoya le *Grand-Orient*, sous la signature de Philippe, duc d'Orléans, grand maître de l'*ordre*, aux souverains d'Allemagne et à l'empereur Joseph II. Ce despote, effrayé de nos mouvements révolutionnaires, venait d'interdire la *maçonnerie* dans ses états. Le *morceau d'architecture* du benédiction ordonnait, dans un style excellent, aux monarques initiés (et ils l'étaient presque tous) de se confédérer pour défendre les principes de notre Assemblée Nationale. ADAM, *L'Enfant d'Austerlitz*, 1902, p. 346.

Rem. 1. Le terme est employé, tant sur le plan concr. que sur le plan abstr., dans des cas très divers où il y a agencement, combinaison de différentes parties pour former un tout, un ensemble homogène, organisé (ou paraissant l'être) selon une certaine structure, un certain plan

Atlas sémantique

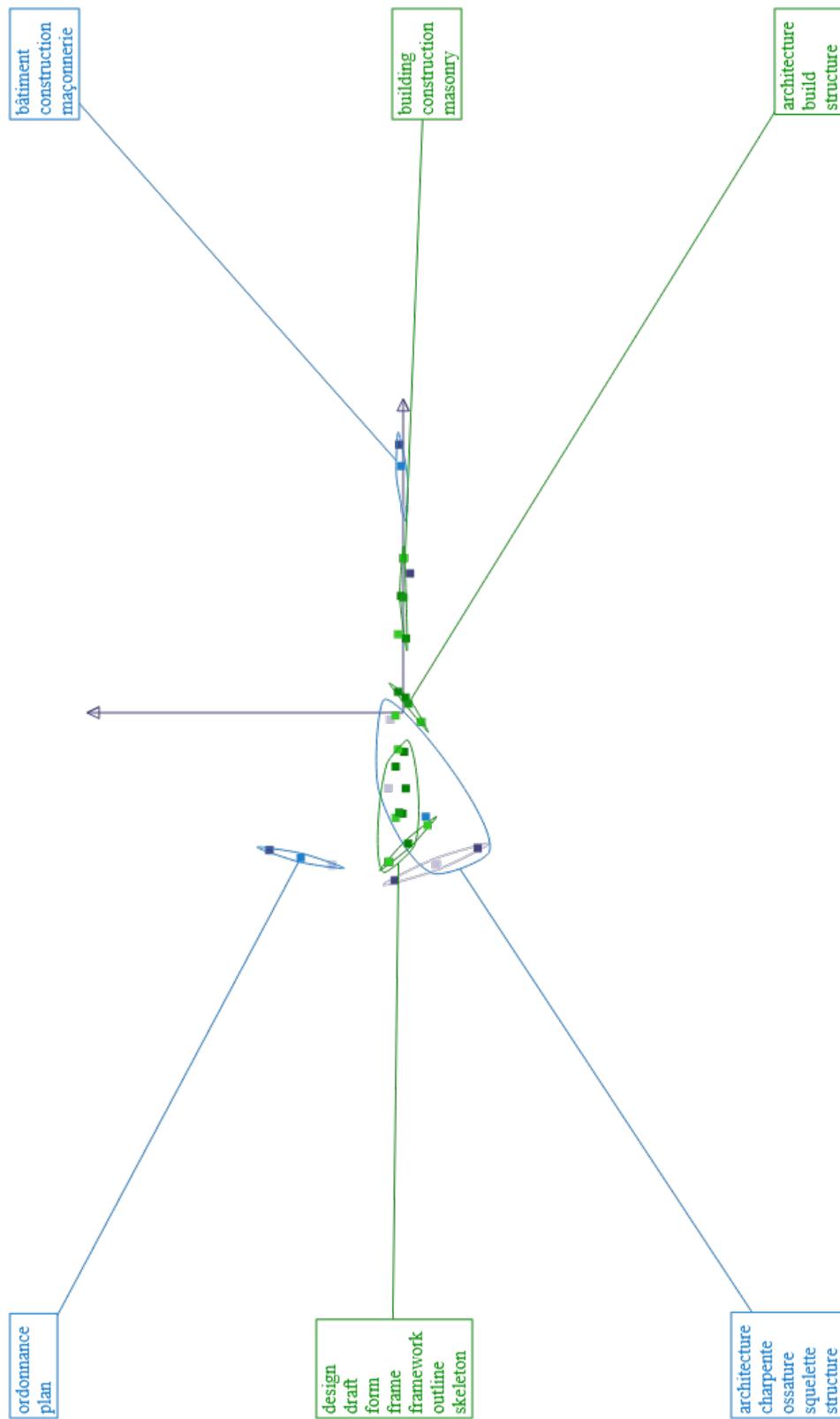


Figure D.2: Atlas sémantique pour le mot *architecture*

D.3 Conception

Lexicographie

Encart D.3

[Conception (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.f. XII^e siècle, au sens physiologique. Emprunté du latin *conceptio* « action de contenir », puis « *conception* », et, en latin chrétien « *idée, pensée* ».

★ I. Action de concevoir un être vivant

[...]

★ II. Fig. Activité de l'esprit en vue de la compréhension ou de l'élaboration de quelque chose. ☆ 1. Class. Faculté de concevoir, de former des idées générales. *Puissance, faiblesse de conception. Il manifeste une grande clarté de conception. Il a la conception facile, vive, lente.* ☆ 2. Action de former le concept d'un objet et, par ext., d'appréhender un objet par la pensée; action de former dans son esprit, d'imaginer, d'inventer. *Cette notion n'est pas susceptible d'une conception claire et distincte. La conception de l'infini échappe-t-elle à l'entendement humain? La conception d'une doctrine, d'une théorie. La conception d'un projet. Un projet au stade de la conception. Suivre un programme d'équipement de la conception à la réalisation. Les défauts de conception d'une machine. Un appareil de conception ancienne, récente.* Spécialt. Idée qui guide la création d'une œuvre et assure son unité. *La conception et la facture d'un tableau. Une mise en scène, un décor de théâtre d'une conception originale. Un roman d'une conception audacieuse.* ☆ 3. Ce que l'esprit crée, produit. *Une des plus belles, des plus prodigieuses conceptions de l'esprit humain.* Spécialt. Doctrine, théorie. *La conception platonicienne de l'État. Les conceptions antiques du mouvement des astres. La conception ondulatoire de la lumière. Des conceptions juridiques, architecturales. Les partisans, les tenants, les adversaires d'une conception.* Par ext. Manière de considérer, d'envisager. *Les conceptions antiques du mouvement des astres. La conception ondulatoire de la lumière. Des conceptions juridiques, architecturales. Une conception originale de l'action dramatique. Promouvoir une conception nouvelle des rapports internationaux. Une conception d'ensemble de la politique de défense. Avoir des conceptions morales élevées. Telle est sa conception de l'honneur. Vous avez une bien étrange conception, une conception toute personnelle de l'honnêteté. Diverses conceptions s'affrontent sur ce sujet.* Spécialt. *Conception du monde, voir Monde.* Par affaibl. Au pluriel et sans complément. Opinion, conviction. *Réviser ses conceptions. Je ne partage pas vos conceptions.* Vieilli. Principes. *De nobles, de basses conceptions.* ☆ 4. INFORM. *Conception assistée par ordinateur* ou C.A.O., ensemble des techniques informatiques qui permettent l'élaboration d'un produit nouveau. *La conception assistée par ordinateur a de nombreuses applications dans l'industrie automobile et l'aéronautique.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

I.– PHYSIOL. [En parlant d'une femme ou p. ext. d'une femelle d'animal vivipare] . Action de former un enfant, un petit en soi. [...]

II.– Au fig., vocab. intellectuel et littér.

A.–

1. Action de concevoir. *Un projet est au stade de la conception. Une conception nette de l'espace dans ses trois dimensions* (COURNOT, *Essai sur les fondements de nos connaissances*, 1851, p. 160). *Reid entend par conception ce que les logiciens entendent ordinai-*

rement par simple appréhension (COUSIN, *Philos. écossaise*, 1857, p. 356). [...]

2. *P. méton.* Résultat de cette action. **a)** Représentation globale. *Une conception du monde.* [...]

- 3. ... si, comme je pense, ce point n'existe pas dans le réel, s'il n'est qu'une pure **conception** de l'esprit, si, pour mieux parler, il s'agit d'un *lieu géométrique*, nous le décrirons en entier, et nous serons ainsi fidèles à notre rendez-vous. ROMAINS, *Les Copains*, 1913, p. 155.

b) *Usuel.* [Le suj. désigne une pers. ou un groupe de pers. ou *p. ext.* une époque, une civilisation] Idée ou représentation particulière d'un objet. *Avoir, se faire une (certaine) conception (originale, particulière, personnelle de qqc.).* Synon. *idée, (point de) vue, théorie.* – Dans le domaine *littér. et philos.* [...]

– Dans le domaine *artistique.* [...]

– Dans le domaine *moral et relig.* *Des conceptions élevées, de basses, nobles conceptions.* [...]

– Dans le domaine *jur. pol.,* souvent au plur. *Des conceptions juridiques, politiques, sociales.* [...]

SYNT. *Fonder, modifier, orienter sa conception de qqc. (sur); s'appuyer sur une conception; se rattacher à la, rejeter une conception (de); les partisans, les tenants d'une conception; une conception dépassée, élargie, étroite, fausse, incomplète, périmée, restrictive de qqc.; une conception actuelle, classique, moderne, révolutionnaire, traditionnelle; une conception est critiquable ou défendable; au plur. diverses conceptions s'affrontent, réviser ses conceptions; confronter ses conceptions avec celles de qqn.*

B.– P. méton. Faculté de concevoir. *Clarté, faiblesse de conception (cf. intellect, intelligence, perception).* [...]

C.– Action de concevoir. Souvent associé à *exécution, réalisation.* [...]

- 5. L'écrivain a, naturellement, des joies pour lesquelles il vit et qui suffisent à le combler. Mais, pour moi, je les rencontre au moment de la conception, à la seconde où le sujet se révèle, où l'articulation de l'œuvre se dessine devant la sensibilité soudain clairvoyante. CAMUS, *L'Envers et l'Endroit*, 1937, p. 22.

[...]

Atlas sémantique

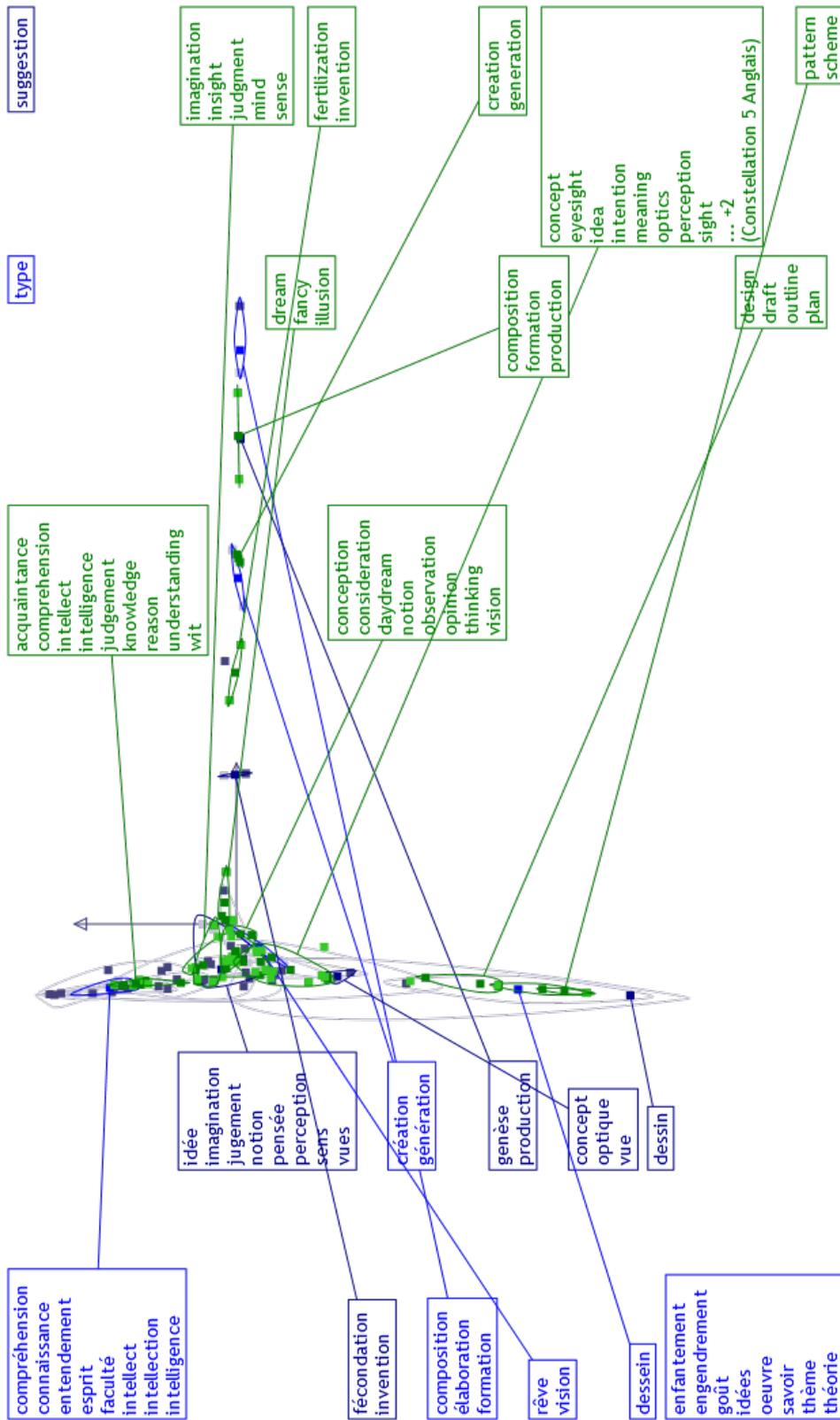


Figure D.3: Atlas sémantique pour le mot *conception*

D.4 Contexte

Lexicographie

Encart D.4

[Contexte (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.m. XVI^e siècle. Emprunté du latin *contextus*, « assemblage, réunion », d'où « enchaînement », de *contexere*, « tisser ensemble, assembler ».

☆ 1. Ensemble du texte entourant un mot, une phrase, un passage. *Fausser le sens d'une citation en l'isolant de son contexte. Cette expression s'éclaire par le contexte. Le contexte de l'article montre que cette affirmation est ironique.*

☆ 2. Fig. Ensemble de circonstances qui accompagnent un évènement, une action. *Tenir compte du contexte social, culturel, historique. Dans le contexte économique d'aujourd'hui. Cet emploi est déconseillé.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

[...]

C.- Ensemble de circonstances liées, situation où un phénomène apparaît, un événement se produit :

[...]

SYNTAGMES *Le, un contexte culturel, économique, géographique, historique, idéologique, psychologique, politique, religieux, social, sociologique; le contexte de l'histoire, d'une sensibilité; par référence au contexte; fait abstrait, détachable, isolé de son contexte; hors du contexte; dans (le, un...) contexte; placer, replacer, saisir, situer un fait, un événement dans le (son) contexte.*

Remarque Cet emploi, qui apparaît vers la fin du XIX^es., est devenu extrêmement fréquent « vers 1960, notamment dans la presse écrite et parlée » (GILB. 1971); il est critiqué par quelques puristes.

Encart D.5

[Environnement (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.m. XIII^e siècle. au sens de « circuit, contour ». Dérivé d'*environner*. Au sens 3, sous l'influence de l'anglais *environment*.

☆ 1. Action d'environner; résultat de cette action.

☆ 2. Ce qui entoure de tous côtés. *Vivre dans un environnement de forêts. Travailler dans un environnement de livres.*

☆ 3. Ensemble des agents chimiques, physiques, biologiques, et des facteurs sociaux exerçant, à un moment donné, une influence sur les êtres vivants et les activités humaines. *Environnement naturel* ou, ellipt., *environnement*, ensemble des éléments naturels de la biosphère. *Protection de l'environnement. Le ministère de l'Environnement. Environnement humain*, ensemble des éléments constituant le milieu humain et social d'un individu. *Environnement culturel. Environnement économique.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

A.– *Rare*. Ensemble des choses qui se trouvent aux environs, autour de quelque chose.

[...]

– *Linguistique* Contexte, en particulier contexte immédiat.

[...]

B.– *Par extension* Ensemble des éléments et des phénomènes physiques qui environnent un organisme vivant, se trouvent autour de lui (*confer milieu*). [...]

– *En particulier* Ensemble des conditions matérielles et des personnes qui environnent un être humain, qui se trouvent autour de lui. *Environnement social, culturel*

Atlas sémantique

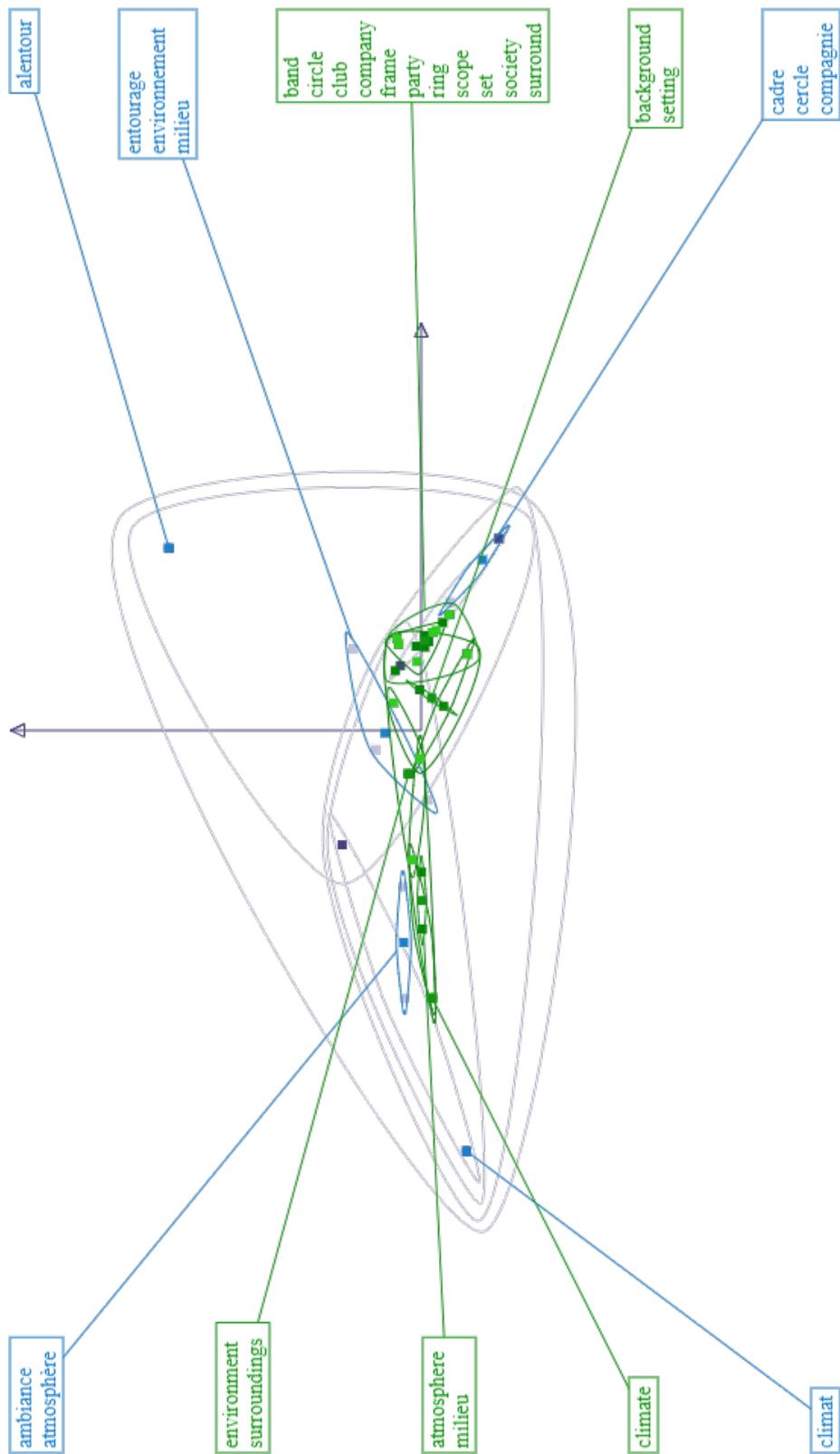


Figure D.4: Atlas sémantique pour le mot *environnement*

D.5 But

Lexicographie

Encart D.6

[But (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.m. XIII^e siècle. Peut-être emprunté de l'ancien bas francique **but*, « *bûche, billot* », pièce qui servait pour le tir à l'arc.

☆ **1.** Point que l'on vise, cible que l'on cherche à atteindre avec un projectile. *Viser, toucher, atteindre le but. Manquer, passer, dépasser le but. Le tireur a mis sa balle en plein but. Au jeu de boules, le cochonnet sert de but.* Par ext. *jeux de ballon.* Endroit où l'on cherche à faire entrer le ballon pour marquer un point. *Gardien de but. Tirer au but. Ligne de but.* Souvent au pluriel. *Une équipe acculée sur ses buts. Défendre ses buts.* Par méton. Point marqué contre l'adversaire. *Marquer un but. Cette équipe a gagné par trois buts à deux.*

☆ **2.** Point que l'on s'efforce d'atteindre, lieu où l'on se propose de se rendre. *Quand l'expédition fut parvenue à son but. Rome était le but de notre voyage. Le village était un de mes buts de promenade. Marcher, se promener sans but. jeux.* Point que l'on doit atteindre le premier pour gagner. *Toucher le but.*

☆ **3.** Fin que l'on se propose ; principale intention que l'on a. *Je n'ai d'autre but que de vous être utile. Tendre vers un but. Agir sans but précis. Être loin de son but. Cacher son but. Aller à son but par des voies détournées. Association sans but lucratif. Aller droit au but, aller directement à la fin qu'on se propose. Toucher au but, parvenir au terme de ses efforts. Atteindre son but, parvenir à ses fins, réaliser ce qu'on s'était proposé. Poursuivre un but, se le proposer. Remplir un but, l'atteindre.* (Ces deux derniers emplois sont déconseillés.)

[...]

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

I.— TECHN. MILIT.

A.— Point, objet que l'on vise afin de le toucher avec un projectile. *Viser le but ; frapper, tirer au but.*

[...]

PARAD. et **SYNT.** **a)** *Cible, point de mire, objectif.* **b)** *Toucher le but ; donner au but ; passer, manquer le but ; servir de but ; coucher en joue le but ; mettre sa flèche en plein but (cf. synonym. mettre dans le mille ; faire mouche) ; braquer son arme vers le but ; but à éclipse, but mobile.*

[...]

B.—ARTILLERIE

[...]

II.— P. ext.

A.— Point de l'espace que l'on s'efforce d'atteindre. *Le but d'une expédition, un but d'excursion ; arriver le premier au but ; atteindre, toucher, dépasser le but.* [...]

JEUX D'ADRESSE, SP.

1. Point de l'espace que l'on doit atteindre le premier pour être considéré comme

gagnant. *Le but d'une course cycliste.* La ligne d'arrivée. *Le but d'une course de chevaux.* La borne d'arrivée.

2. [Au jeu de barres, à chat perché] Endroit où le joueur doit se réfugier pour n'être pas pris; *p. ext.*, endroit où il doit se placer pour jouer **3.** [Dans les sp. d'équipe utilisant un ballon] Endroit dans lequel un joueur doit envoyer ou placer le ballon pour marquer. [...]

B.– *P. méton.* Point marqué lorsqu'un point de l'espace est atteint. [...]

III.– *Au fig.* Fin que l'on se propose, intention animant un acte ou motivant une démarche. *Se proposer, atteindre, rechercher un but; avoir pour but de; n'avoir d'autre but que.*

[...]

A.– [L'accent est mis sur l'exécution d'un projet précis] *Synon. objet, objectif; intention, propos.*

[...]

B.– [Il s'agit d'un projet gén. dont l'échéance n'est pas arrêtée dans le temps; abs. de détermination adj.] Orientation fondamentale que l'homme donne à sa vie. *Synon. sens, raison de vivre.*

[...]

Atlas sémantique

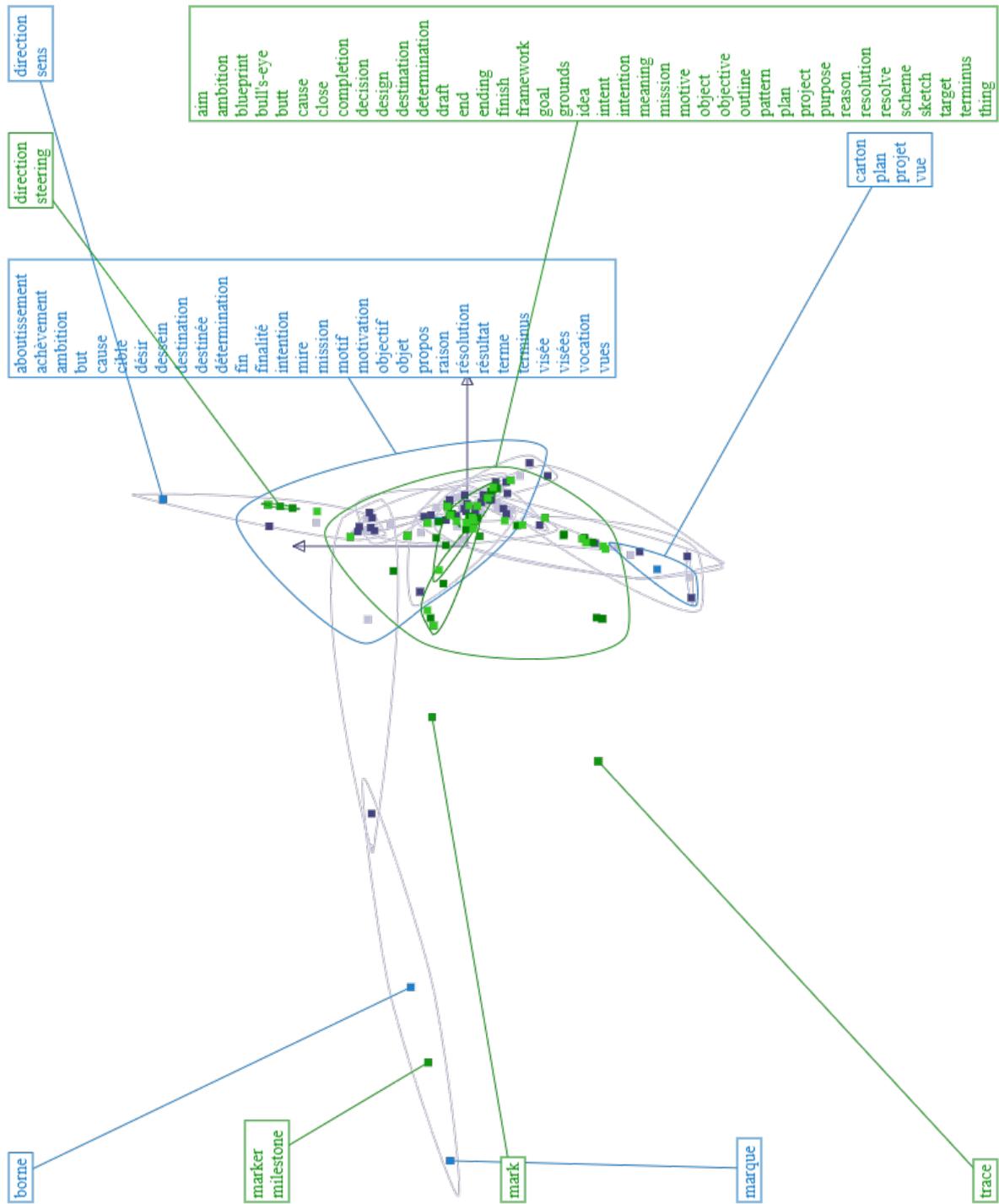


Figure D.5: Atlas sémantique pour le mot *but*

D.6 Capacité

Lexicographie

Encart D.7

[Capacité (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.f. XIV^e siècle, d'abord au sens de « *faculté de comprendre* ». Emprunté du latin *capacitas*, dérivé de *capax*, -*acis*, « *qui peut contenir, qui contient* ».

☆ **1.** Contenance. *La capacité d'une bouteille, d'une barrique, d'une citerne. La capacité d'un réfrigérateur s'exprime en litres.* Spécialt. *Mesures de capacité*, unités de volume pour les liquides ou certaines denrées sèches. *Le setier, le boisseau, le muid sont d'anciennes mesures de capacité. Le litre, l'hectolitre, le baril sont des mesures actuelles de capacité.* PHYSIOL. *La capacité pulmonaire, ou la capacité vitale*, la plus grande quantité d'air que des poumons puissent contenir, mesurée entre une inspiration et une expiration forcées. - ANAT. *Capacité crânienne*, volume de la cavité interne de la boîte crânienne.

☆ **2.** Aptitude. *Je doute beaucoup de sa capacité à tenir cet emploi. Une grande capacité de travail. Une exceptionnelle capacité de résistance.* Par ext. Au pluriel. *Compétences, habileté. Il ne manque pas de capacités intellectuelles. Juger des capacités professionnelles d'un stagiaire.* Employé seul. *Je fais appel à vos capacités.*

☆ **3.** PHYS. *Capacité calorifique ou thermique*, quantité de chaleur nécessaire pour augmenter d'un degré la température d'un corps. - ÉLECTR. *Capacité d'un accumulateur*, quantité d'électricité que peut restituer un accumulateur pendant la décharge. *La capacité d'un accumulateur s'exprime en ampères-heures. Capacité d'un condensateur*, quotient de la charge électrique d'un condensateur par la différence de potentiel entre ses armatures. *La capacité d'un condensateur s'exprime en farads.* - PHYSIOL. CHIM. *Capacité de fixation, capacité de saturation*, quantité d'une substance qui peut être fixée, qui peut saturer une quantité donnée d'un corps chimique, d'un tissu. *La capacité de saturation du sang en oxygène.* - INFORM. *Capacité d'une mémoire*, quantité maximale d'informations pouvant être enregistrée dans une mémoire d'ordinateur. - P. ET CH. *Capacité d'une route*, quantité maximale de véhicules qui peut être écoulee par cette route dans des conditions données et en un temps déterminé. - NAVIGATION. *Capacité d'une voie navigable*, trafic maximal annuel que peut assurer cette voie.

☆ **4.** DROIT. Aptitude d'une personne à être titulaire d'un droit : *Capacité de jouissance* ; à l'exercer : *Capacité d'exercice. Avoir capacité pour tester. Les mineurs n'ont pas la capacité de contracter. La capacité d'un donateur est appréciée d'après les lois en vigueur à l'époque de la donation. Capacité électorale*, aptitude à bénéficier de la qualité d'électeur. *La capacité électorale a été liée à la naissance, à la fortune, au sexe ; elle l'est aujourd'hui à l'âge, à la nationalité, au domicile, à la jouissance des droits civiques.* Spécialt. *Capacité en droit*, diplôme délivré par les facultés de droit à des étudiants non bacheliers après deux ans d'études. *La capacité en droit peut conduire à la carrière notariale.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

A.– Aptitude à contenir ; quantité, volume de matière ou d'énergie, qui peut être contenu ou stocké dans un contenant.

[...]

1. Domaines *particuliers*

a) [*Capacité* est précédé d'un autre subst. qui le spécifie] MÉTROL. *Mesures de capacité*. Récipients servant à mesurer les liquides et les matières granulées.

b) [*Capacité* est suivi d'une détermination (adj. ou compl. prép.) qui précise la nature du contenant]

– AGRIC. *Capacité au champ*. Teneur en eau du sol qui a subi les pluies et qui s'est ensuite ressuyé.

– ANTHROPOL. *Capacité crânienne*. Volume de la cavité interne de la boîte crânienne.

– ÉLECTR. *Capacité d'un accumulateur, d'un condensateur, d'un conducteur*.

– MAR. *Capacité en balles*. Volume des compartiments situés sous le pont et réservés aux marchandises. *Capacité en grains* (Lar. encyclop., LE CLÈRE 1960).

– PHYSIOL. *Capacité pulmonaire vitale*. « *Volume maximal d'air inspiré après une expiration forcée ou volume maximal d'air expiré après une inspiration forcée* » (Méd. Biol. t. 1 1970).

[...]

2. *P. métaph.* [En parlant de l'esprit] Aptitude à contenir, à recevoir :

[...]

B.– [Souvent avec un déterminant indiquant le siège ou la nature ou le domaine d'application de la capacité] Aptitude à faire quelque chose.

1. [En parlant de l'homme] *Souvent au plur. Capacité(s) humaine(s); capacité de l'homme; capacité(s) d'abstraction, de résistance :*

[...]

a) *Spéc., textscdr. Capacité juridique, civile, politique, etc.* Aptitude d'une personne à jouir de certains droits ou à les exercer :

[...]

◆ *Avoir capacité pour*. Avoir l'autorité légale pour.

– DR. COMM. Aptitudes requises pour l'exercice d'un commerce. *Capacité en matière de chèque; capacité en matière d'ordres de Bourse*.

b) *P. méton.*

– ADMIN. UNIVERSITAIRE. *Capacité en droit*. « *Diplôme conféré par les Facultés de Droit après deux années d'étude à des étudiants de qui le baccalauréat de l'enseignement secondaire n'est pas exigé* » (CAP. 1936); [...]

– *Au plur. (Les) capacités*. Gens compétents, de savoir :

[...]

2. *P. anal.*

a) [En parlant d'une activité de l'homme] *La capacité de production et de vente* (J.-A. LESOURD, C. GÉRARD, *Hist. écon., XIX^e et XX^{es}*, t. 1, 1968, p. 17).

– ÉCON. *Capacité de production*. „Quantité ou volume maximum de marchandises qu'une entreprise peut produire si tout son matériel et tout son personnel sont employés à plein rendement“ (PUJOL 1970).

b) BOT. « *Faculté que possède le corps d'une plante d'acquérir, au terme de son développement, une dimension déterminée dans des conditions extérieures constantes. Capacité de ramification, nutritive, propagative* » (GATIN 1924).

[...]

Atlas sémantique

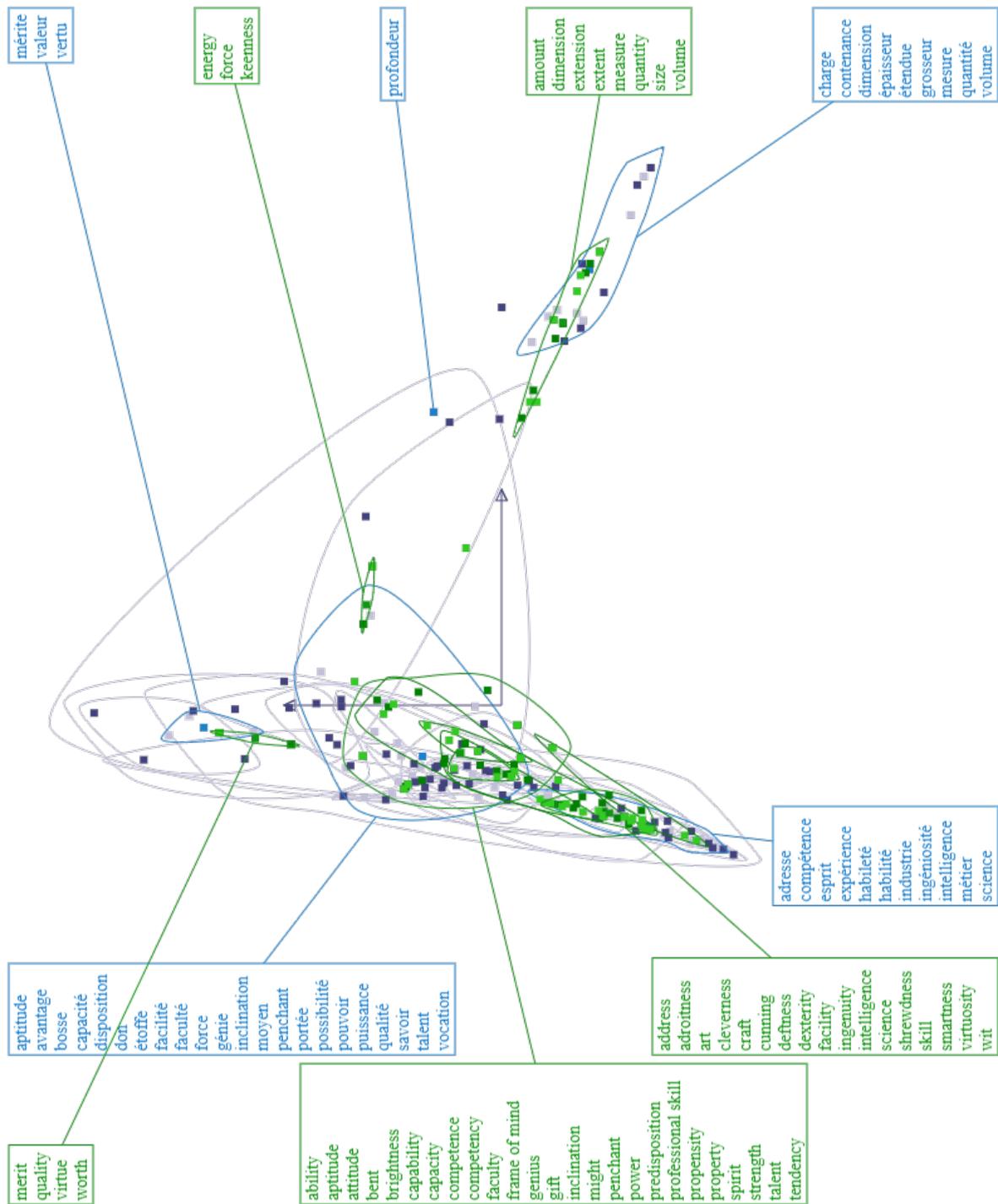


Figure D.6: Atlas sémantique pour le mot *capacité*

Compléments

Nous rapprochons le concept d'autres concepts dans d'autres domaines sous forme d'une carte heuristique ci-après.

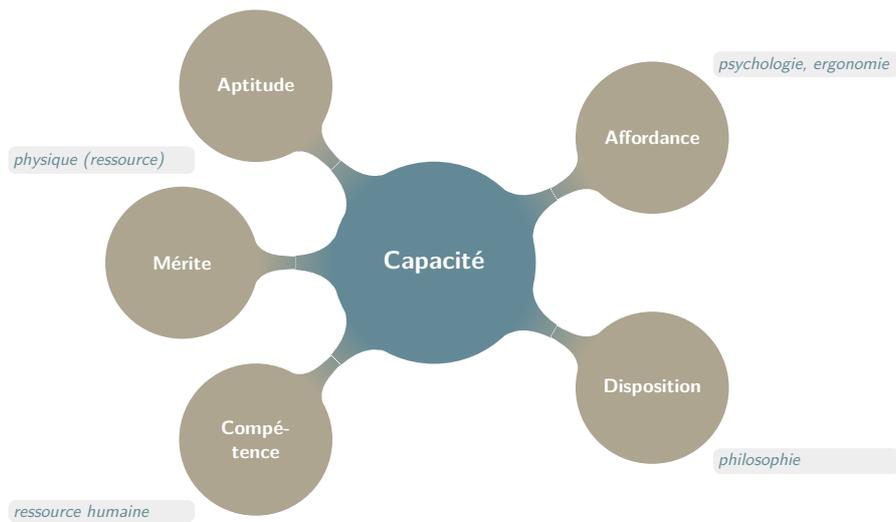


Figure D.7: Proximité du concept de capacité avec d'autres concepts

Nous reproduisons également une proposition d'ontologie de la capacité effectué par le groupe de travail CWG (*Capability Working Group*) du chapitre local de l'INCOSE au Royaume-Uni (*INCOSE UK*).

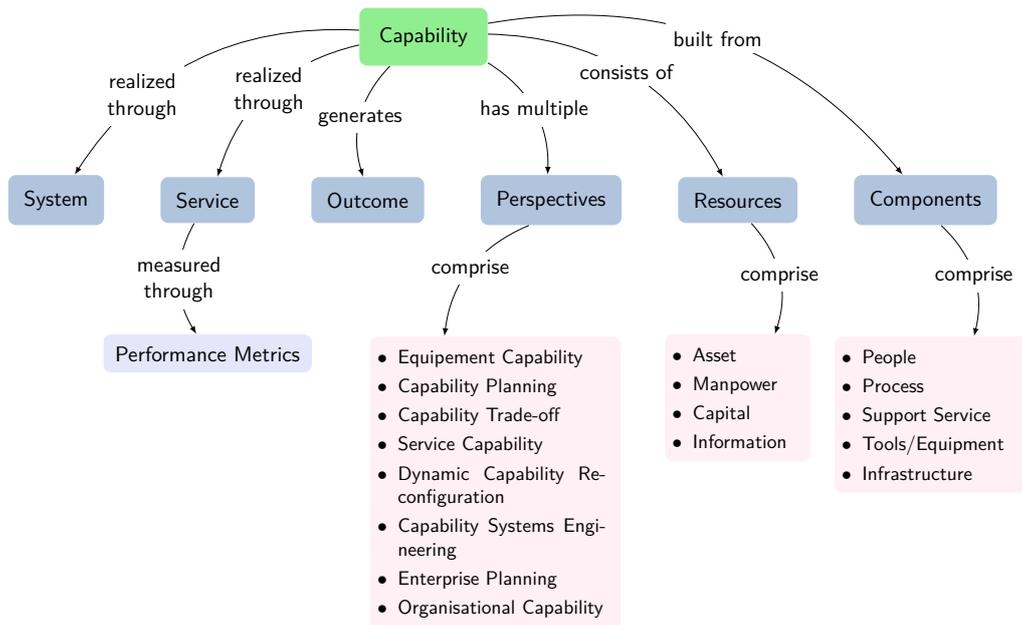


Figure D.8: Ontologie de la capacité (extrait et inspiré de [DHJ12])

D.7 Forme

Lexicographie

Encart D.8

[Forme (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.f. XI^e siècle. Emprunté du latin *forma*, « moule ; beauté ; forme, espèce ».

★ I. Aspect extérieur, configuration caractéristique ou particulière. *La forme du corps humain. La forme du visage. La forme d'une maison. Une forme géométrique. Une cour de forme ronde, carrée. Ce jardin a la forme d'un rectangle, une forme rectangulaire. Un polygone de forme irrégulière. Cette montagne est en forme de cône. Changer de forme. Perdre sa forme. N'avoir plus de forme. Prendre, reprendre forme. Fig. Ce projet, ce travail prend forme.* • Spécialt. Par méton. Être indistinct dont on ne perçoit que la silhouette. *Une forme qui s'éloigne.* • Par ext. Le plus souvent au pluriel. Les contours, les lignes. *Les formes du corps humain. Un athlète aux formes longilignes. La beauté d'une forme, l'élégance des formes. Des formes architecturales, ornementales. Les formes élancées des cathédrales gothiques.* En parlant du corps féminin. *Des formes épanouies. Sa robe met ses formes en valeur.* Loc. fam. *Prendre des formes, de l'embonpoint. Bien en forme, bien en chair.*

★ II. État particulier et variable d'un être, d'une chose, d'un sentiment, etc. *Les différentes formes de l'énergie. La forme cristalline d'un sel. Les formes du sentiment religieux. Il y a en lui une forme de bravoure.* • Spécialt. MÉD. *Forme clinique*, ensemble de caractères définissant certaines variétés des maladies. *Forme fébrile, forme douloureuse, forme aiguë. Forme chronique, forme atténuée, forme maligne.* - BIOL. Ensemble de caractères qui, à l'intérieur d'une espèce, déterminent des distinctions d'ordre biologique. *Forme mâle, forme femelle. Forme larvaire, forme adulte.* - BOT. Forme biologique, aspect que prennent les plantes à une saison donnée, et selon lequel on les répartit en différentes catégories (on dit plutôt *Type biologique*). • POLIT. et DROIT. En parlant d'une société, d'une collectivité, son principe d'organisation. *Un État de forme monarchique, républicaine. Une entreprise constituée sous la forme d'une société anonyme.* • LINGUIST. Chacun des aspects particuliers sous lesquels peut se présenter un même mot. *Dans les langues à déclinaisons, la forme d'un mot varie selon sa fonction. Les formes grammaticales. Les formes du féminin, du pluriel.* • Loc. *Sous la forme de ou sous forme de* suivi d'un nom, *sous forme* suivi d'un adjectif. *Les dieux de la mythologie apparaissaient aux humains sous des formes diverses. L'ange apparut au jeune Tobie sous la forme d'un voyageur. Disposer d'une somme sous forme de numéraire. Prescrire un médicament sous forme soluble, sous la forme de pilules.*

★ III. En parlant des œuvres de l'esprit.

☆ 1. Manière dont on exprime sa pensée, dont on compose un ouvrage. Souvent par opposition à *Contenu* ou à *Fond*. *Vous pouviez exprimer cette idée sous une autre forme, sous une forme plus claire, plus concise. Cette critique est courtoise dans sa forme. Il a su donner à ce sujet une forme neuve, originale. Mettre en forme*, donner à un écrit la forme correcte et élégante qui convient. • Absolt. *La forme*, le style, la composition, ce qui relève de l'art. *Le souci de la forme. Le culte exclusif de la forme. Sacrifier le fond à la forme.*

☆ 2. Mode de composition littéraire ou musical érigé en genre, en modèle. *Donner à*

un récit la forme d'un journal, d'une correspondance. Il s'est essayé à diverses formes littéraires. Poèmes à forme fixe, à forme libre ou, par méton., formes fixes, formes libres. Le sonnet, la ballade sont des formes fixes. Un finale en forme de rondo. La forme scherzo, la forme menuet. La forme sonate.

★ **IV.** Manière d'être, d'agir, de se conduire, de procéder, etc., conforme à certains usages, à certaines règles, ou à quelque modèle.

[...]

★ **V.** Principe d'unité, de synthèse et d'organisation.

☆ **1.** PHILOSOPHIE GÉNÉRALE Principe qui détermine et perfectionne la matière en la faisant passer de la virtualité à l'actualité, de la puissance à l'acte. *Selon Aristote, la forme achève la matière comme l'acte achève la puissance. Forme substantielle, en scolastique, principe de détermination inhérent à une substance, à la nature d'un être, par opposition à Forme accidentelle, détermination particulière et contingente qui ne modifie pas la nature de cet être. Forme des vertus (vieilli), principe qui porte l'énergie spirituelle à sa perfection. Pour les chrétiens, la charité est la forme des vertus.* • Chez Kant, forme désigne un principe constitutif de la connaissance, une loi de la pensée. *L'espace et le temps sont les formes a priori de la sensibilité. Les formes de l'entendement, les concepts purs a priori, ou catégories. Les formes de la raison, les Idées de la raison pure. Forme de l'acte moral, constituée par l'intention de celui qui agit. La moralité d'un acte dépend exclusivement de sa forme, déterminée par l'impératif catégorique. Forme de la moralité, caractère de la loi morale, qui fait qu'elle s'impose de manière impérative à la conscience.*

☆ **2.** PSYCHOL. Ensemble cohérent d'éléments, caractérisé par les relations qui existent entre ces divers éléments, ainsi qu'entre eux et l'ensemble lui-même. *La perception de la forme précède celle des éléments. Psychologie de la forme. Théorie de la forme (en allemand Gestalttheorie), qui généralise les conceptions de la psychologie de la forme en les appliquant à la biologie et à la physique.*

☆ **3.** LOGIQUE. Ensemble des rapports établis entre les termes d'un raisonnement, lorsqu'on les considère à part, indépendamment de leur contenu. *La forme d'une démonstration. Un syllogisme est en forme lorsque la conclusion découle nécessairement des prémisses. Un raisonnement en forme, qui est conforme aux règles de l'argumentation logique.*

☆ **4.** LINGUIST. *La forme d'une langue, sa configuration particulière, telle qu'elle ressort de l'ensemble de ses règles internes.*

★ **VI.** Emplois techniques et spécialisés.

[...]

★ **VII.** Fig. et fam. Condition physique.

[...]

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

I.— Ensemble de traits caractéristiques qui permettent à une réalité concrète ou abstraite d'être reconnue

[...]

A.—

1.

a) Qualité d'un objet, résultant de son organisation interne, de sa structure, concrétisée par les lignes et les surfaces qui le délimitent, susceptible d'être appréhendée par la vue et le toucher, et permettant de le distinguer des autres objets indépendamment de sa nature et de sa couleur.

[...]

b) Spéc. [En parlant d'un être vivant]

[...]

1. *P. anal.***a)** [En parlant d'une œuvre littér. ou mus., ou de l'un de leurs éléments] Structure, plan, agencement.

[...]

b) CHIM., *vieilli*. *Forme moléculaire*. Manière dont sont agencés les atomes dans une molécule; structure d'une molécule [...]**3.** *Au fig.* Modalité, manière, état dans lequel se manifeste une réalité concrète ou abstraite : **a)** [En parlant d'une réalité concrète]

[...]

b) [En parlant d'une réalité abstraite]

[...]

SYNT. *Forme abstraite, achevée, acquise, actuelle, concrète, dégénérée, discutable, dramatique, élémentaire, étriquée, moderne, particulière, rationnelle, rudimentaire, scientifique, simplifiée, symbolique, systématique, tangible, théorique, variable; forme collective, individuelle; forme cosmique, psychique, psychologique, sociale.*◆ *En partic.***α)** [En parlant d'un régime pol.]

[...]

β) LING. Aspect sous lequel se présente un mot ou un énoncé.

[...]

γ) MÉD.. *Forme clinique d'une maladie* ou, absol., *forme*. Aspect, modalité définie par un ensemble de signes cliniques.

[...]

c) Spéc. MATH.

[...]

d) *P. ext.***α)** Manière d'exprimer quelque chose, formulation, tournure. (*Vieilli*) *formes brèves, concises, tranchantes; formes proverbiales.*

[...]

β) *Vieilli*. Manière de procéder.

[...]

B.– *P. ext.* Apparence, aspect, traits caractéristiques de quelque chose.

[...]

◆ *En partic.* *Forme humaine.*

[...]

Au fig. Ensemble des attributs spirituels de l'être humain.

[...]

– **En forme de** + subst.◆ *Loc. à valeur adj.* Dont l'aspect, la structure rappelle celui (celle) de (quelque chose).

[...]

◆ *Loc. à valeur adv., vieilli*

[...]

– **Sous (la) forme de** + subst. Avec l'aspect, la structure de (quelque chose).

◆ [Appliqué à une réalité concr.]

[...]

◆ [Appliqué à une réalité abstr.]

[...]

B.– *Spécialement*

1.

a) [La (les) forme(s) envisagée(s) sur le plan esthétique et indépendamment de l'objet qui en est le support] *Beauté, harmonie, ordonnance des formes; rapport des formes; choix des formes; langage des formes, univers des formes.*

[...]

b) *Au sing.*

α) B.-A. *La forme plastique*, ou absol. et gén. | *a forme. Châtier, schématiser, styliser la forme.* [...]

β) *P. anal.* LITT., MUS. Aspect esthétique, style d'une œuvre.

[...]

– *P. méton. La forme d'un auteur.* Son style.

[...]

2. [La forme p. oppos. à la matière] :

[...]

– *Loc. Donner, prendre forme; mettre en forme.*

[...]

a)

α) [En parlant d'une réalité concr.]

[...]

β) [En parlant d'une manifestation de l'activité intellectuelle ou artistique] *Une œuvre qui prend forme.*

[...]

γ) [En parlant d'une réalité abstr.]

[...]

b) *Spéc.* [La forme en tant que symbole de l'existence véritable, de la signification]

[...]

– PHILOSOPHIE

α) PHILOS. ARISTOTÉLICHIENNE ET SCOLASTIQUE. Cause première et principe d'unité d'un être.

[...]

β) PHILOS. KANTIENNE [Dans la théorie de la connaissance] Ce qui vient du sujet connaissant (formes à priori de la sensibilité, catégories de l'entendement, idées de la raison).

[...]

– THÉOL. *Forme d'un sacrement.* Paroles sacramentelles qui confèrent leur signification aux gestes rituels

[...]

3. [La forme en tant que revêtement extérieur du fond, du contenu, de l'ensemble] [...]

a) LOG. CLASS. Nature du rapport qui existe entre les termes d'un raisonnement, d'une proposition, indépendamment de la matière ou du contenu des termes du raisonnement, de la proposition. *Forme correcte.*

[...]

b) Dans le domaine du *dr.* Conditions dans lesquelles doit fonctionner l'appareil judiciaire; aspect extérieur à donner à un acte juridique, et, *p. méton.*, règles qui les régissent.

[...]

c) LING. [P. oppos. au sens] *Les formes signifiantes et les idées signifiées* (Langage, 1968, p. 455).

d) Dans le domaine du *comportement* [...]

II.– *P. méton.*

A.–

1.

a) Réalité concrète ou abstraite dotée d'une forme (supra I), d'une organisation, d'une structure déterminée et susceptible de fonctionner de façon autonome.

[...]

– *En partic.*

α) BIOL. Synon. de *espèce*.

[...]

β) LITT., MUS. Synon. de *genre*.

[...]

b) *Spéc.*, PHILOS. Ensemble ou entité dotés de propriétés résultant non de la somme de celles de ses constituants, mais des relations existant entre ceux-ci. Synon. *structure*.

[...]

◆ *Bonne forme*. Forme la plus stable, la plus géométriquement symétrique, la plus prégnante; celle qui s'impose la première à l'esprit et à la perception

[...]

2. Être (ou objet) aperçu de manière imprécise; silhouette.

[...]

B.– *Spécialement*

1. Objet de forme ou de structure déterminée.

[...]

2. Contenant destiné à un contenu particulier.

[...]

3. Outil, moule, matrice destinée à donner sa forme à un objet.

[...]

Atlas sémantique

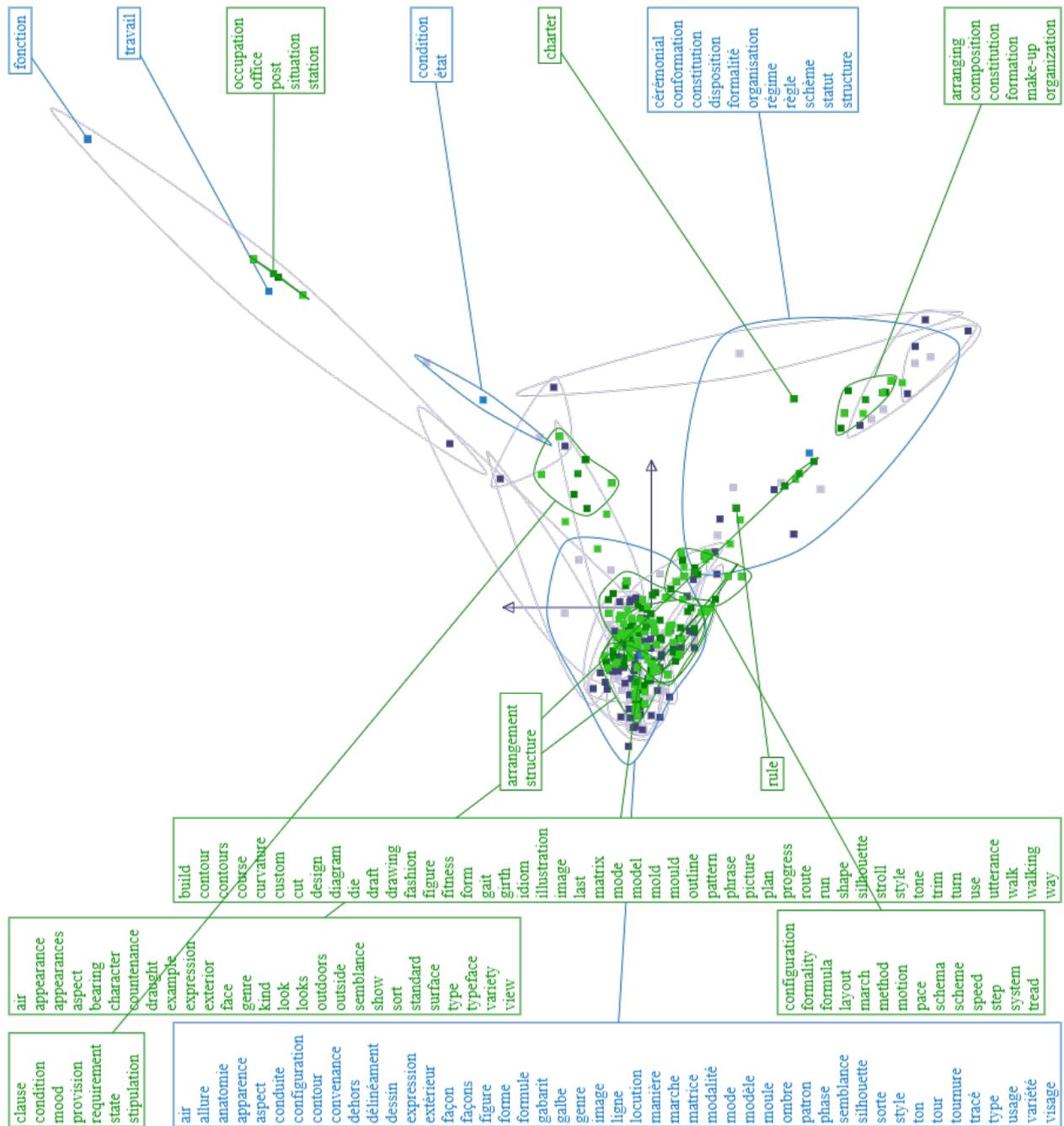


Figure D.9: Atlas sémantique pour le mot *forme*

D.8 Comportement

Lexicographie

Encart D.9

[Comportement (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]n.m. XV^e siècle. Dérivé de *comporter*.

☆ **1.** Manière de se comporter et d'agir. *Un comportement bizarre, inquiétant, suspect. On ne sait jamais quel sera son comportement. Il faudra qu'il change de comportement ! Il a le comportement d'un homme bien élevé.* ÉTHOLOGIE. Ensemble des activités des êtres vivants et de leurs réactions physiologiques aux conditions de leur milieu. *Le comportement des abeilles. Observer, faire varier le comportement. Les troubles du comportement. La psychologie du comportement.* • Spécialt. *Le comportement alimentaire, sexuel, culturel.* ☆ **2.** Par anal. En parlant de choses. Manière d'évoluer, de se transformer. *Le comportement d'un électron. Le comportement du franc, des valeurs boursières.*

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

A.— PSYCHOL. Ensemble des réactions observables chez un individu placé dans son milieu de vie et dans des circonstances données. *Étude, science du comportement ; psychologie du comportement ; le comportement humain.*

[...]

SYNT. **a)** *Champ, espace, milieu, niveau de comportement ; formule, unité du comportement ; trait, type de comportement ; dissonance de comportement ; anomalie de comportement ; composante de comportement ; modification du comportement.* **b)** *Comportement d'appétence ; comportement opérant ; comportement latent, manifeste ; comportement acquis, actif, adaptatif, instinctif, réflexe ; comportement normal ; comportement linguistique, verbal ; comportement émotif, infantile, névrotique ; comportement sexuel, social ; comportement criminel ; le comportement de l'épileptique.* **c)** *Analyser, expliquer, observer un comportement ; conditionner un comportement.*

[...]

B.— *P. ext., lang. cour.* Manière d'être ou d'agir d'une personne

1. [Considérée dans son ensemble] *Changer son comportement, démentir son comportement ; cette façon d'agir n'est pas dans son comportement.*

[...]

– [Le compl. de nom désigne un groupe de pers.] *Le comportement des Français.*

[...]

PARAD. *Air, allure, (ligne de) conduite, façon de faire, genre de vie, manière d'être, d'agir, de vivre, m¹/₂urs, réaction(s), tempérament.*

[...]

2. [Considérée dans une situation particulière] *Adopter, avoir, prendre un comportement (suivi d'un adj.) à l'égard de, envers qqn, face à qqc., vis-à-vis de qqn ou de qqc.* Synon. *attitude, tenue.*

[...]

SYNT. **a)** *Commander, dicter, régir, régler un comportement ; expliquer les raisons de son comportement ; s'excuser de son (vilain) comportement (irrespectueux, malséant, mauvais) à l'égard de qqn ; être excédé par le comportement de qqn ; prédisposer à*

un comportement. b) Un curieux, un singulier comportement; un comportement de bravade, de tristesse; le comportement électoral, moral, politique, scolaire d'une pers. ou d'un groupe de pers.; le comportement d'un auditoire; le comportement délictueux d'une pers. ou d'un groupe de pers.

[...]

C.— BIOL., MED.

1. [En parlant de tout organisme vivant végétal, animal, en partic. dans le domaine de la biol. et de la méd.] *La génétique du comportement.*

[...]

2. [En parlant d'une chose concr. et en partic. dans le domaine des sc. phys.] [...]

Atlas sémantique

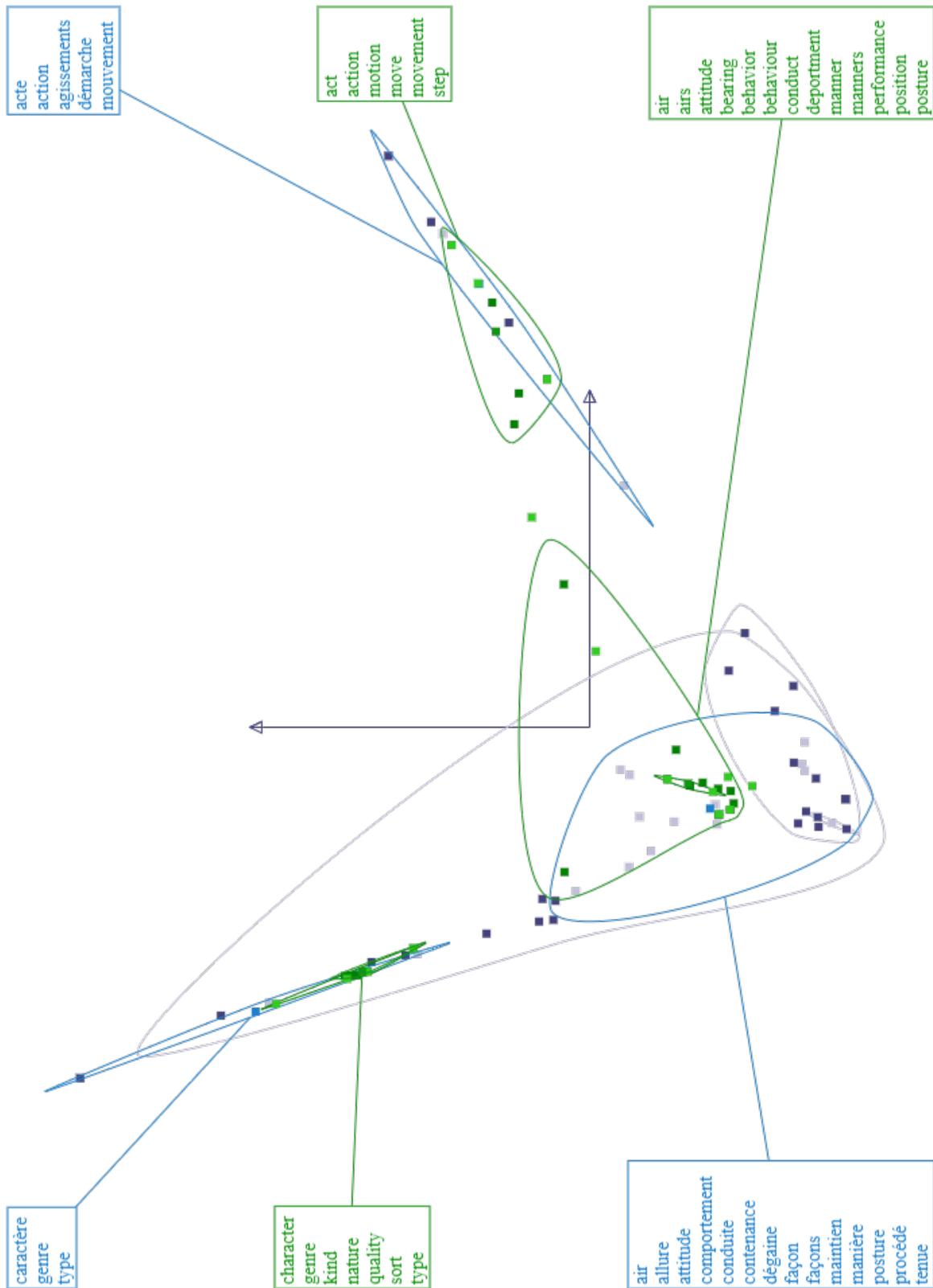


Figure D.10: Atlas sémantique pour le mot *comportement*

D.9 Concept

Lexicographie

Encart D.10

[Concept (substantif)]

[Dictionnaire de l'Académie française, 9^e édition]

n.m. XV^e siècle. au sens de « *dessein, projet* ». Emprunté du latin *conceptus*, « *action de contenir, de recevoir* », « *réunion, procréation* », puis, en latin chrétien, « *conception de l'esprit, pensée* ». Idée abstraite et générale.

☆ **1.** LOGIQUE. Construction de l'esprit explicitant un ensemble stable de caractères communs désigné par un signe verbal. *Le concept regroupe les objets qu'il définit en une même catégorie appelée « classe ». Le concept d'homme, d'arbre, de maison. On définit un concept en compréhension et en extension. La formation des concepts. Concept a priori ou concept pur, non tiré de l'expérience. Concept a posteriori, empirique.*

☆ **2.** ÉPISTÉMOLOGIE. En mathématiques, notion rigoureusement définie qui sert de fondement ou de principe. *Le concept de cercle, de triangle, de nombre, d'ensemble, de sous-ensemble.* Dans les sciences expérimentales, idée explicative découlant d'une théorie générale et que l'on vérifie par l'expérimentation. *Les relations entre les concepts de pesanteur, d'énergie, de masse.*

☆ **3.** Par affaibl. Notion abstraite que l'on a ou que l'on se fait personnellement d'une chose, d'une qualité, d'un projet. Son concept de l'honneur diffère du mien.

[Dictionnaire Les Trésors de la Langue Française]

A.– Vx. Faculté, manière de se représenter une chose concrète ou abstraite ; résultat de ce travail ; représentation.

[...]

B.– Usuel

1. PHILOS. Représentation mentale abstraite et générale, objective, stable, munie d'un support verbal. *Le concept de vérité, le concept de cercle.* Synon. *catégorie, classe, schème, symbole.* *Cette philosophie du concept est devenue chez Platon la dialectique, et chez Aristote, la construction métaphysique et scientifique que l'on sait, où la méthode est demeurée essentiellement dialectique* (L. LÉVY-BRUHL, *La Mor. et la sc. des mœurs*, 1903, p. 63). *La philosophie, remontant du percept au concept, voit se condenser en logique tout ce que le physique avait de réalité positive* (BERGSON, *L'Évolution créatrice*, 1907, p. 320). *Qu'est-ce qu'un concept ? [selon Kant] C'est un moyen de juger, c'est-à-dire un universel, une forme de classe sous laquelle on peut subsumer un singulier* (O. HAMELIN, *Essai sur les éléments principaux de la représentation*, 1907, p. 30). [...]

SYNT. *Le concept d'espace, de mouvement, de temps, de cause ; le contenu, la compréhension, l'extension d'un concept, la connotation d'un concept ; former le/un concept de qqc., subsumer un donné ou un ensemble de données sous un concept, épuiser un concept.* [...]

3. P. ext. a) Vocab. sc. eb gén. [...]

b) Dans la lang. littér. et culturelle. Quasi synon. de *idée*. *L'idée, que le fait, que le concept d'un péché* (PÉGUY, *Victor-Marie, Comte Hugo*, 1910, p. 824). *Je ne me fais pas d'Esprit [le pigeon] et de mon attirance vers lui un concept précis, clair, distinct ?*

Eh ! j'en conviens (BARRÈS, *Le Mystère en pleine lumière*, 1923, p. 63). *La France, décidément, n'était pour moi ni une déesse abstraite, ni un concept d'historien, mais bien une chair dont je dépendais* (SAINT-EXUPÉRY, *Lettre à un otage*, 1943, p. 395) : [...]

Atlas sémantique

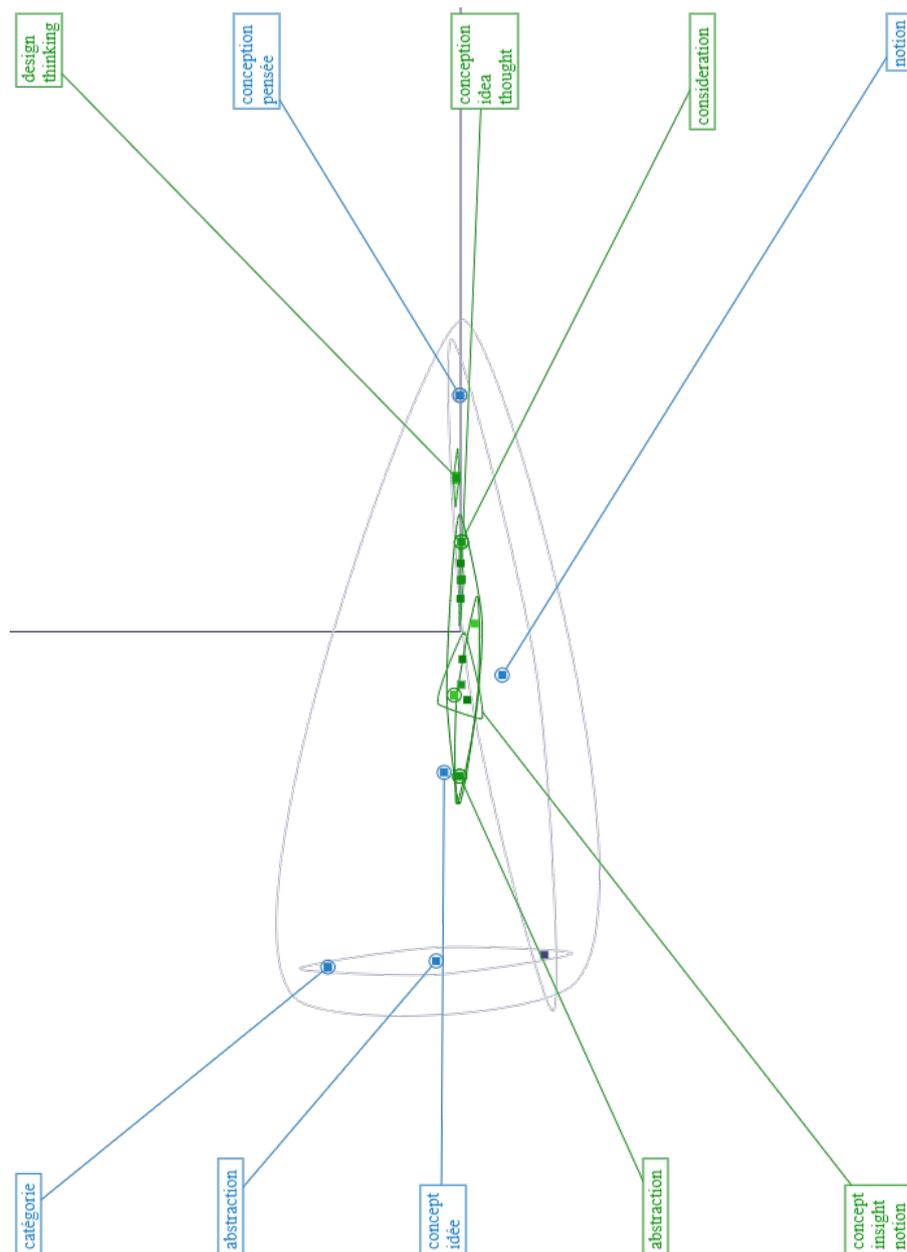


Figure D.11: Atlas sémantique pour le mot *concept*

Bibliographie

- [ABP17] Audrey Akoun, Philippe Boukobza, and Isabelle Pailleau. *Apprendre avec le sketchnoting, Comment ré-enchanter les manières d'apprendre*. Eyrolles, 2017.
- [AK54] Armen A. Alchian and Reuben A. Kessel. A proper role of systems analysis. Technical report, RAND Corporation, 1954.
- [Ale64] Christopher Alexander. *Notes on the synthesis of form*. Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts), 1964.
- [Ale66] Christopher Alexander. A city is not a tree. *Design, London : Council of Industrial Design*, (206), 1966.
- [Ale77] Christopher Alexander. *A pattern language : towns, buildings, construction*. Oxford university press, 1977.
- [And72] P. W. Anderson. More is different. *Science*, 177(4047) :393–396, aug 1972.
- [Arc65] L Bruce Archer. *Systematic method for designers*. London : Council of Industrial Design, 1965.
- [Asi62] Morris Asimow. *Introduction to design*. Prentice-Hall, 1962.
- [Atl18a] À propos des atlas sémantiques. http://www.atlas-semanticues.eu/Apropos_as.html?l=FR, 2018. accédé le 5 mars 2018.
- [Atl18b] Les atlas sémantiques. <http://www.atlas-semanticues.eu>, 2018. accédé le 1er mars 2018.
- [Aug93] Saint Augustin. *Les Confessions*, volume Livre XI - La création et le temps of *Garnier Flammarion / Philosophie*. Flammarion, 1993.
- [Ban96] Bela H Banathy. *Designing social systems in a changing world*. Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1996.
- [Bay04] Nigan Bayazit. Investigating design : A review of forty years of design research. *Design issues*, 20(1) :16–29, 2004.
- [BB05] David C Brown and Lucienne Blessing. The Relationship Between Function and Affordance. In *Volume 5a : 17th International Conference on Design Theory and Methodology*, volume 2005, pages 155–160, 2005.
- [BBHR⁺16] Michael Behrisch, Benjamin Bach, Nathalie Henry Riche, Tobias Schreck, and Jean-Daniel Fekete. Matrix reordering methods for table and network visualization. In *Computer Graphics Forum*, volume 35, pages 693–716. Wiley Online Library, 2016.

BIBLIOGRAPHIE

- [BC00] Carliss Young Baldwin and Kim B Clark. *Design rules : The power of modularity*, volume 1. MIT press, 2000.
- [BDPS00] Philippe Boudon, Philippe Deshayes, Frédéric Pousin, and Françoise Schatz. *La conception architecturale, Cours d'architecturologie*. Savoir-faire pour l'architecture. Editions de la Vilette, seconde édition, revue et augmentée edition, 2000.
- [BDt83] Mario Bunge and Hélène Donadieu (traductrice). *Épistémologie*. Maloine éditeur, 1983.
- [Ber50] Ludwig Von Bertalanffy. An Outline of General System Theory (1950). *The British Journal For Philosophy Of Science*, 1(2) :134–165, 1950.
- [Ber69] Ludwig Von Bertalanffy. *General systems theory : Foundations, development, application*. G. Braziller, 1969.
- [BF81] B.S. Blanchard and W.J. Fabrycky. *Systems engineering and analysis*. Prentice-Hall international series in industrial and systems engineering. Prentice-Hall, 1981.
- [BKH⁺16] Benjamin Bach, Natalie Kerracher, Kyle Wm Hall, Sheelagh Carpendale, Jessie Kennedy, and Nathalie Henry Riche. Telling stories about dynamic networks with graph comics. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3670–3682. ACM, 2016.
- [BKW⁺95] Roger Bate, Dorothy Kuhn, Curt Wells, James Armitage, and Gloria Clark. A systems engineering capability maturity model, version 1.1. Technical report, Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh PA Software Engineering Inst, 1995.
- [BLB⁺17] Matthew Brehmer, Bongshin Lee, Benjamin Bach, Nathalie Henry Riche, and Tamara Munzner. Timelines revisited : A design space and considerations for expressive storytelling. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(9) :2151–2164, 2017.
- [Boe84] Barry W. Boehm. Verifying and validating software requirements and design specifications. *IEEE software*, 1(1) :75, 1984.
- [Boe88] Barry W. Boehm. A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21(5) :61–72, 1988.
- [Bou03] Philippe Boudon. *Sur l'espace architectural, Essai d'épistémologie de l'architecture*. Collection eupalinos, série Architecture et Urbanisme. Editions Parenthèses, nouvelle édition revue et augmentée edition, 2003.
- [Bou04] Philippe Boudon. *Conception*. Collection Passage. Éditions de la Vilette, 2004.
- [BR84] R.C. Booton Jr. and Simon Ramo. The Development of Systems Engineering. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, AES-20(4) :306–309, 1984.
- [Bri98] James H. Brill. Systems engineering, a retrospective view. *Systems Engineering*, 1(4) :258–266, 1998.
- [Bro09] Tim Brown. *Change by design : How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation*. Harper Collins, 2009.
- [BSV09] John Boardman, Brian J Sauser, and Dinesh Verma. In search of systems "dna". *JCP*, 4(10) :1043–1052, 2009.

- [Bue00] Dennis M. Buede. *The engineering design of systems : models and methods*. Wiley, New York, 2000.
- [Bun79] Mario Augusto Bunge. *Treatise on Basic Philosophy : Ontology II : A World of Systems*. Dordrecht, Holland : D. Reidel Publishing Company, 1979.
- [CBW92] W.L. Chapman, A.T. Bahill, and A.W. Wymore. *Engineering Modeling and Design*. Systems Engineering. Taylor & Francis, 1992.
- [CCS15] Edward Crawley, Bruce Cameron, and Daniel Selva. *System architecture : strategy and product development for complex systems*. Prentice Hall Press, 2015.
- [CDT00] Chun Wei Choo, Brian Detlor, and Don Turnbull. *Web work, information seeking and knowledge work on the World Wide Web*. Springer Science+Business Media,, 2000.
- [Cha74] Wilton P. Chase. *Management of system engineering*. John Wiley & Sons, 1974.
- [Che65] Harold Chesnut. *Systems Engineering Tools*. Wiley Series on Systems Engineering and Analysis, 1965.
- [Che67] Harold Chesnut. *Systems Engineering Methods*. Wiley Series on Systems Engineering and Analysis, 1967.
- [CL09] Pascal Cantot and Dominique Luzeaux. *Simulation et modélisation des systèmes de systèmes, vers la maîtrise de la complexité*. Hermès-Lavoisier, Paris, 2009.
- [Cla97] William J Clancey. *Situated cognition : On human knowledge and computer representations*. Cambridge university press, 1997.
- [Cla11] Damien Claeys. Architecture & complexité, un modèle systémique du processus de conception qui vise l'architecture. In *8e Congrès international de l'Union Européenne de Systémique*, 2011.
- [Cla13a] Damien Claeys. *Architecture & complexité, Un modèle systémique du processus de (co)conception qui vise l'architecture*. PhD thesis, Université catholique de Louvain, September 2013.
- [Cla13b] Damien Claeys. *Architecture & complexité, Un modèle systémique du processus de (co)conception qui vise l'architecture*, volume Tome 11 of *Thèses de la Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme*. Presses universitaires de Louvain, octobre 2013.
- [Cla15] Damien Claeys. Concevoir un projet d'architecture calmer les certitudes, gérer l'incertitude. *Lieuxdits#9 - Sérendipité*, (9) :20–23, 2015.
- [Cou07] Design Council. Eleven lessons : Managing design in eleven global companies-desk research report. *Design Council*, 2007.
- [Cou14] Louise Couvelaire. Frank gehry, l'angoisse de la ligne droite. *M le magazine du Monde*, septembre 2014.
- [CR14] Yves Carcelle and Anne-Line Roccati. *La fondation Louis Vuitton par Frank Gehry : Une architecture pour le XXIe siècle*. Le bâtiment, Livres. Flammarion, octobre 2014.
- [Cra07] Edward Crawley. Introduction to system architecture, architecture to value in esd.34 system architecture. *Massachusetts Institute of Technology : MIT OpenCourseWare*, (MIT Course Number ESD.34), January IAP 2007.

BIBLIOGRAPHIE

- [Cra09] Edward F Crawley. Lunar architecture analysis. In *USCC Programmatic Workshop on NASA LSS Concepts*, february 2009.
- [Cro89] Nigel Cross. *Engineering design methods*. John Wiley & Sons, 1989.
- [DDC97] Jean Dubois and Françoise Dubois-Charlier. *Les verbes français*. Larousse, 1997.
- [DHJ12] Huseyin Dogan, Michael Henshaw, and Julian Johnson. An incremental hybridisation of heterogeneous case studies to develop an ontology for capability engineering. 22 :956–971, 07 2012.
- [dlcedlc16] Ministère de la culture et de la communication. Décret no 2016-1738 du 14 décembre 2016 relatif à des dispenses de recours à un architecte. Décrets, arrêtés, circulaires MCCB1625185D, Journal Officiel, 2016.
- [dISedIR14] Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Arrêté du 4 février 2014 fixant la nomenclature des mentions du diplôme national de master. Décrets, arrêtés, circulaires ESRS1402516A, Journal Officiel, 2014.
- [DM14] Anthony Di Mari. *Conditional Design. An Introduction to Elemental Architecture*. BIS Publishers B.V., 2014.
- [DMY12] Anthony Di Mari and Nora Yoo. *Operative design : A catalog of spatial verbs*. BIS Publishers B.V., 2012.
- [DoD74] DoD. MIL STD 499A (USAF). engineering management. Standard, Department of Defense, Washington, D. C. 20331, may 1974.
- [DoD94] DoD. MIL STD 499B. systems engineering. Standard, Department of Defense, Washington, D. C. 20331, may 1994.
- [DoD01] DoD. System engineering fundamentals. Technical report, Department of Defense - Systems Management College, Defense Acquisition University Press, Fort Belvoir, VA, 2206, january 2001.
- [DoD12] CIO DoD. Dod architecture framework version 2.02. *DoD Deputy Chief Information Officer, Available online at http://dodcio.defense.gov/dodaf20/dodaf20_pes.aspx*, accessed Nov, 2012.
- [Dor02] Dov Dori. *Object-process methodology : a holistic systems paradigm*. Springer Verlag, 2002.
- [dR77] Joël de Rosnay. *Le Macroscopie, Vers une vision globale*. Seuil - Points Essais, février 1977.
- [DS16] Ferdinand De Saussure. *Cours de linguistique générale*. coll. « Grande bibliothèque Payot ». Payot, 1955 (1^{ère} éd. 1016).
- [Dub04] Hugh Dubberly. How do you design. *A compendium of Models*, 2004.
- [DV05] Kees Dorst and Pieter E. Vermaas. John gero's function-behaviour-structure model of designing : a critical analysis. *Research in Engineering Design*, 16(1) :17–26, Nov 2005.
- [Eck13] Claudia Eckert. That which is not form : The practical challenges in using functional concepts in design. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 27(03) :217–231, 2013.
- [Eco92] Umberto Eco. *Les limites de l'interprétation*. Le Livre de Poche. Grasset, 1992.

- [EIA99] EIA. ANSI/EIA-632-1998 processes for engineering a system. Standard, Electronic Industries Alliance, January 1999.
- [EIA03] EIA. Ansi/eia-632-2003. processes for engineering a system. Standard, Electronic Industries Alliance, September 2003.
- [EJ16] Claudia Eckert and Marija Jankovic. System Architecture Design . *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 30(3), 2016.
- [EKV⁺08] M. S. Erden, H. Komoto, T. J. Van Beek, V. D'Amelio, E. Echavarria, and T. Tomiyama. A review of function modeling : Approaches and applications. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing : AIEDAM*, 22(2) :147–169, 2008.
- [Ern15] Dominique Ernadote. An ontology mindset for system engineering. In *Systems Engineering (ISSE), 2015 IEEE International Symposium on*, pages 454–460. IEEE, 2015.
- [Ern16] Dominique Ernadote. Ontology reconciliation for system engineering. In *Systems Engineering (ISSE), 2016 IEEE International Symposium on*, pages 1–8. IEEE, 2016.
- [Ern17] Dominique Ernadote. Ontology-based pattern for system engineering. In *2017 ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS)*, pages 248–258. IEEE, 2017.
- [EU95] Steven D Eppinger and Karl T Ulrich. *Product design and development*. McGraw-Hill New York, 1995.
- [EU12] Steven Eppinger and Karl Ulrich. *Product design and development*. McGraw-Hill, 5th ed. edition, 2012.
- [FAA06] FAA. National airspace system - system engineering manual. Handbook, Federal Aviation Administration - ATO Operation Planning, October 2006.
- [Fai13] Alain Faisandier. *Systems architecture and design*. Sinergy'Com, 2013.
- [FCF⁺08] Donald G Firesmith, Peter Capell, Dietrich Falkenthal, Charles B Hammons, DeWitt T Latimer IV, and Tom Merendino. *The method framework for engineering system architectures*. Auerbach Publications, 2008.
- [Fit51] Paul M. Fitts, editor. *Human Engineering for an Effective Air-Navigation and Traffic-Control System*. 1951.
- [For18] The Open Group Architecture Forum. *Togaf® standard, version 9.2*. Technical report, The Open Group, 2018.
- [Fow03] Martin Fowler. Who needs an architect? *IEEE Softw.*, 20(5) :11–13, September 2003.
- [Fre85] M. J. French. *Conceptual Design for Engineers*. Springer Berlin Heidelberg, 1985.
- [Gal09] Per Galle. The ontology of gero's fbs model of designing. *Design Studies*, 30(4) :321 – 339, 2009.
- [GBM10] Dave Gray, Sunni Brown, and James Macanufo. *Gamestorming : A Playbook for Innovators, Rulebreakers, and Changemakers*. O'Reilly Media, August 2010.
- [Ger90] John S. Gero. Design prototypes : A knowledge representation schema for design. *AI Mag.*, 11(4) :26–36, October 1990.

BIBLIOGRAPHIE

- [Gil13] Tom Gilb. What is wrong with current software architecture methods : 10 principles for improvement. In *Oslo Software Architecture Meetup*, September 2013.
- [GK00] John S Gero and Udo Kannengiesser. Towards a situated function-behaviour-structure framework as the basis for a theory of designing. In *Workshop on Development and Application of Design Theories in AI in Design Research, Sixth International Conference on Artificial Intelligence in Design, Worcester, MA*. Citeseer, 2000.
- [GK02] John S Gero and Udo Kannengiesser. The situated function-behaviour-structure framework. *Artificial Intelligence in Design'02*, pages 89–104, 2002.
- [GK06] John S Gero and Udo Kannengiesser. A function-behaviour-structure ontology of processes. In *In J. S. Gero (ed), Design Computing and Cognition'06*, pages 407–422. Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [GK07] John S. Gero and Udo Kannengiesser. A function-behavior-structure ontology of processes. In *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing : AIEDAM*, volume 21, pages 379–391, 2007.
- [GK14] John S. Gero and Udo Kannengiesser. *The Function-Behaviour-Structure Ontology of Design*, pages 263–283. Springer London, London, 2014.
- [GM57] Harry H Goode and Robert E. Machol. *System engineering : an introduction to the design of large-scale systems*. McGraw-Hill Book Co., New York, 1957.
- [Gol91] Gabriela Goldschmidt. The dialectics of sketching. 4 :123–143, 01 1991.
- [Gos62] William Gosling. *The design of engineering systems*. Wiley, New York, 1962.
- [GRV09] Ashok Goel, Spencer Rugaber, and Swaroop Vattam. Structure , Behavior and Function of Complex Systems : The SBF Modeling Language. *Ai Edam*, 23(1) :23–35, 2009.
- [Hal62] Arthur D. Hall. *A methodology for systems engineering*. Van Nostrand Reinhold Inc.,U.S., 1962.
- [Has08] Cecilia Haskins. *Systems engineering analyzed , synthesized , and applied to sustainable industrial park development*. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- [HF06] Nathalie Henry and Jean-Daniel Fekete. Matrixexplorer : a dual-representation system to explore social networks. *IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics*, (5) :677–684, 2006.
- [HFM06] Nathalie Henry, Jean-Daniel Fekete, and Michael McGuffin. Nodetrix : a hybrid visualization of social networks. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 13(6) :1302–1309, 2006.
- [Hit92] Derek K Hitchins. *Putting systems to work*, volume 325. Wiley Chichester, 1992.
- [Hit07] D.K. Hitchins. *Systems Engineering : A 21st Century Systems Methodology*. Wiley Series in Systems Engineering and Management. Wiley, 2007.
- [Hit13] World class systems engineering. <http://www.hitchins.net/systems/systems-engineering.html>, 2013. accédé le 20 juillet 2018.

- [Hoa56] Malcolm W. Hoag. An Introduction to Systems Analysis. Technical report, RAND Corporation, 1956.
- [Hor04] Dr Roni Horowitz. *ASIT, Méthode pour des solutions innovantes (paru sous le titre original « Introduction to ASIT », traduit par Pascal Jarry)*. SolidCreativity, 2004.
- [HS06] Arnaldo Hax and Rohan Sahani. Discovering new sources of growth and profitability in a networked economy in 15.902 strategic management i. *Massachusetts Institute of Technology : MIT OpenCourseWare*, (MIT Course Number 15.902), Fall 2006.
- [Huo05] Stéphane Huot. *Une nouvelle approche pour la conception créative : De l'interprétation du dessin à main levée au prototypage d'interactions non-standard*. PhD thesis, Université de Nantes, 2005.
- [HW02] Armand Hatchuel and Benoit Weil. La théorie C-K : Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. In *Colloque Â« Sciences de la conception Â»*, pages 1–24, 2002.
- [IEE99] IEEE. ANSI/IEEE 1220-1998 - ieee standard for application and management of the systems engineering process. Ieee standard, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999.
- [IEE05] IEEE. Ansi/ieee 1220-2005 - ieee standard for application and management of the systems engineering process. Ieee standard, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [INC06] INCOSE. Systems engineering handbook - a guide for system life cycle processes and activities. Handbook INCOSE-TP-2003-002-03, International Council on Systems Engineering, June 2006.
- [INC07] INCOSE. Systems engineering handbook - a guide for system life cycle processes and activities. Handbook INCOSE-TP-2003-002-03.1, International Council on Systems Engineering, August 2007.
- [INC10] INCOSE. Systems engineering handbook - a guide for system life cycle processes and activities. Handbook INCOSE-TP-2003-002-03.2, International Council on Systems Engineering, January 2010.
- [INC12] INCOSE. Systems engineering handbook - a guide for system life cycle processes and activities. Handbook INCOSE-TP-2003-002-03.2.2, International Council on Systems Engineering, January 2012.
- [INC15] INCOSE. *Systems Engineering Handbook - A guide for system life cycle processes and activities*. Wiley, 4 edition, July 2015.
- [Inc18] What is systems engineering? <https://www.incose.org/systems-engineering>, 2018. accédé le 20 juillet 2018.
- [ISO02] ISO/IEC. ISO/IEC 15288 :2002 - systems engineering – system life cycle processes. Ieee standard, International Organization for Standardization, JTC1/SC7, November 2002.
- [ISO08] ISO/IEC. ISO/IEC 15288 :2008 - systems engineering – system life cycle processes. Ieee standard, International Organization for Standardization, JTC1/SC7, February 2008.
- [ISO11] ISO/IEC. ISO/IEC/IEEE 42010 :2011 - systems and software engineering — architecture description. Iso standard, International Organization for Standardization, JTC1/SC7, December 2011.

BIBLIOGRAPHIE

- [ISO15] ISO/IEC. ISO/IEC 15288 :2015 - systems engineering – system life cycle processes. Ieee standard, International Organization for Standardization, JTC1/SC7, may 2015.
- [ISO17] ISO/IEC. ISO/IEC/IEEE 42020 :2017 - enterprise, systems and software – architecture processes. Iso standard, dis, International Organization for Standardization, JTC1/SC7, 2017.
- [JB05] A. Jansen and Jan Bosch. Software Architecture as a Set of Architectural Design Decisions. *5th Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture (WICSA'05)*, pages 109–120, 2005.
- [Jon69] John Ch. Jones. The state-of-the-art in design methods. In *Design Methods in Architecture*, volume 6. George Wittenborn New York, 1969.
- [Jon70] John Chris Jones. *Design methods : seeds of human futures*. John Wiley & Sons, 1970.
- [Jon92] John Chris Jones. *Design methods*. John Wiley & Sons, 1992.
- [Ken62] John F. Kennedy. Address at rice university on the nation's space effort, 1962.
- [KKC00] Rick Kazman, Mark Klein, and Paul Clements. Atam : Method for architecture evaluation. Technical report, Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh PA Software Engineering Inst, 2000.
- [KM57] H Kahn and I Mann. Techniques of systems analysis. Technical report, RAND Corporation, 1957.
- [Koe64] Arthur Koestler. *The Act of creation*,. Hutchinson and Macmillan, 1964.
- [Koe13] Arthur Koestler. *Le cheval dans la locomotive. (The Ghost in the Machine)*. Les Belles Lettres, 2013.
- [Koo05] Hsueh-Yung Benjamin Koo. *A Meta-language for Systems Architecting*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2005. AAI0807850.
- [Kro17] Daniel Krob. Cesam : Cesames systems architecting method a pocket guide. 2017.
- [Kru04] Philippe Kruchten. An ontology of architectural design decisions in software intensive systems. In *2nd Groningen workshop on software variability*, pages 54–61, 2004.
- [KS02] A. Kossiakoff and W.N. Sweet. *Systems Engineering Principles and Practice*. Wiley Series in Systems Engineering and Management. Wiley, 2002.
- [Law14] Bryan Lawson. *How designers think : the design process demystified*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [Lie07] Anthony Liew. Understanding data, information, knowledge and their inter-relationships. *Journal of Knowledge Management Practice*, 8(2) :1–16, 2007.
- [Lie14] Jeanne Liedtka. Innovative ways companies are using design thinking. 42, 03 2014.
- [Lin06] Yi Lin. *General systems theory : a mathematical approach*, volume 12. Springer Science & Business Media, 2006.
- [LKB13] J. Liedtka, A. King, and K. Bennett. *Solving Problems with Design Thinking : Ten Stories of What Works*. Columbia Business School Publishing. Columbia University Press, 2013.
- [LM90] Jean-Louis Le Moigne. *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod, 1990.

- [LM10] Jean-Louis Le Moigne. Agir \leftrightarrow penser en complexité. le discours de la méthode de notre temps. In *Que peut être aujourd'hui une formation citoyenne à l'Agir \leftrightarrow Penser en Complexité?* Conférence Grand Débat 2010 du Réseau Intelligence de la Complexité, 2010.
- [LMHW14] Pascal Le Masson, Armand Hatchuel, and Benoit Weil. *Théorie, méthodes et organisations de la conception*. Sciences de la conception. 2014.
- [LMW14] Dominique Luzeaux, Thierry Morlaye, and Jean-Luc Wippler. If we engineered systems like we produce movies. In Frédéric Boulanger, Daniel Krob, Gérard Morel, and Jean-Claude Roussel, editors, *Proceedings of the Poster Workshop at the 2014 Complex Systems Design and Management International Conference (CSDM 2014 Poster Workshop)*, number 1234 in CEUR Workshop Proceedings, pages 151–160, Aachen, 2014.
- [LMW15] Dominique Luzeaux, Thierry Morlaye, and Jean-Luc Wippler. Chances are the architecture looks fuzzy : Pitch it right! In *2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)*, pages 278–285. IEEE, sep 2015.
- [Lov12] Russell Alexander Loveridge. *Process Bifurcation and the Digital Chain in Architecture*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012.
- [LR13] Dominique Luzeaux and Jean-René Ruault. *L'ingénierie système*. Afnor, 2013.
- [LR18] Bas Leurs and Isobel Roberts. *Playbook for innovation learning*. Technical report, Nesta, Avril 2018.
- [LRW11] Dominique Luzeaux, Jean-René Ruault, and Jean-Luc Wippler. *Maitrise de l'ingénierie des systèmes complexes et des systèmes de systèmes, étude de cas*. Hermès-Lavoisier, Paris, 2011.
- [LRW15] Dominique Luzeaux, Jean-René Ruault, and Jean-Luc Wippler. Introduction à l'ingénierie système : Les concepts généraux. *Techniques de l'ingénieur Modélisation et analyse de systèmes asservis*, (s7300), 2015. fre.
- [LS87] Jill H Larkin and Herbert A Simon. Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive science*, 11(1) :65–100, 1987.
- [Luz15] Dominique Luzeaux. A formal foundation of systems engineering. In *Complex Systems Design & Management*, pages 133–148. Springer, 2015.
- [LW17] Dominique Luzeaux and Jean-Luc Wippler. Beyond the crawley's FCF, a new paradigm for architecture elaboration and conceptualization. *2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)*, 2017.
- [MA07] Bill Moggridge and Bill Atkinson. *Designing interactions*, volume 17. MIT press Cambridge, MA, 2007.
- [Mac65] Robert E. Machol. *System engineering handbook*. McGraw-Hill, New York, 1965.
- [Mag10] Christopher L. Magee. Network representations of complex engineering systems. *Lecture Notes, MIT OCW, ESD 342*, 2010.
- [Man66] Manned Spacecraft Center Houston, Texas. *Proceedings of the Apollo Lunar Landing Mission Symposium*, number NASA TM X-58006. National Aeronautics and Space Administration, June 1966.
- [Mar96] James N. Martin. *Systems Engineering Guidebook : A Process for Developing Systems and Products*. Systems Engineering. CRC Press, 1996.

BIBLIOGRAPHIE

- [Mar04] James N Martin. The seven samurai of systems engineering : Dealing with the complexity of 7 interrelated systems. In *INCOSE International Symposium*, volume 14, pages 459–470. Wiley Online Library, 2004.
- [Mar16] James N Martin. Overview of an emerging standard on architecture processes - iso/iec 42020. *INCOSE International Symposium*, 26(1) :1431–1447, 2016.
- [MB06] Ruth Malan and Dana Bredemeyer. Software architecture action guide. Technical report, Bredemeyer Consulting, 2006.
- [McK14] Robert McKee. *Story, Substance, structure, style and the principles of screenwriting*. Methuen, 2014.
- [Meg08] NG Megastructures. Queen mary 2 [m/cd]. *National Geographic HD, American*, 2008.
- [Mei98] Jean-Pierre Meinadier. *Ingénierie et intégration des systèmes*. Hermès, Paris, 1998.
- [Mer08] Brad Mercer. Thoughts on architecting and how to improve the practice. Presented to Systems Engineering Colloquium Naval Postgraduate School Monterey, California, 2008.
- [MF12] Jean-Pierre Meinadier and Serge Fiorèse. *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*. Cépadués éditions, 2012.
- [Mil56] George A. Miller. The magic number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information, 1956.
- [Mil04] Alain Mille. Cognition située (morceaux choisis et librement traduits/commentés du livre de clancey (clancey 1997)). Note de cours du DEA LEACM, 2004.
- [MJ73] Ralph F Miles Jr. *Systems concepts : Lectures on contemporary approaches to systems*. Wiley Series on Systems Engineering and Analysis, 1973.
- [MN10] Ronald D. Moen and Clifford L. Norman. Clearing up myths about the deming cycle and seeing how it keeps evolving. *Quality Progress*, november 2010.
- [Mor05] Edgar Morin. *Introduction à la pensée complexe*. Seuil, Paris, 2005.
- [MT75] Mihajlo D Mesarovic and Yasuhiko Takahara. *General systems theory : mathematical foundations*, volume 113. Academic Press, 1975.
- [NAS95] NASA. Nasa/sp-6105 - nasa systems engineering handbook. Handbook, National Aeronautics and Space Administration, 1995.
- [NAS07] NASA. Nasa/sp-6105 rev1 - nasa systems engineering handbook. Handbook, National Aeronautics and Space Administration, 2007.
- [NAS17] NASA. Nasa/sp-6105 rev2 - nasa systems engineering handbook. Handbook, National Aeronautics and Space Administration, 2017.
- [New94] Allen Newell. *Unified theories of cognition*. Harvard University Press, 1994.
- [New18] Damien Newman. The design squiggle-central. <http://cargocollective.com/central/The-Design-Squiggle>, 2018. accédé le 5 mars 2018.
- [oHS07] U.S. Department of Homeland Security. Target capabilities list : A companion to the national preparedness guidelines, september 2007.

- [oHS10] U.S. Department of Homeland Security. National planning scenarios, january 2010.
- [oHS13] U.S. Department of Homeland Security. National response framework, may 2013.
- [Par07] Gyung-Jin Park. *Analytic methods for design practice*. Springer Science & Business Medi, 2007.
- [PBW84] G. Pahl, W. Beitz, and K. Wallace. *Engineering design*. Design Council, 1984.
- [Pei58] Charles S. Peirce. *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, volume 1-8. Harvard University Press, 1931-1958.
- [Peu14] Thomas Peugeot. System engineering, for a cognitive sciences approach. *Complex Systems Design & Management*, page 342, 2014.
- [Pla10] H Plattner. An introduction to design thinking process guide. the institute of design at stanford, 2010.
- [Pug91] Stuart Pugh. *Total design : integrated methods for successful product engineering*. Addison-Wesley Wokingham, 1991.
- [PV98] Sabine Ploux and Bernard Victorri. Construction d'espaces sémantiques à l'aide de dictionnaires de synonymes. *Traitement Automatique des Langues*, (39) :161–182, 1998.
- [Ray99] Dominique Raynaud. Le schème : opérateur de la conception architecturale. *Intellectica-La revue de l'Association pour la Recherche sur les sciences de la Cognition (ARCo)*, 29(2) :35–69, 1999.
- [RM96] E. Reichtin and M. Maier. *The art of systems architecting*. Systems engineering series. CRC Press, 1996.
- [RMM06] J. Reekie, R.J. Mcadam, and R. McAdam. *A Software Architecture Primer*. Angophora Press, 2006.
- [Row07] Jennifer Rowley. The wisdom hierarchy : representations of the dikw hierarchy. *J. Information Science*, 33 :163–180, 2007.
- [Sag77] Andrew P. Sage. *Systems engineering : methodology & applications*. IEEE Computer Society Press, 1977.
- [Sag92] Andrew P. Sage. *Systems engineering*, volume 6 of *Wiley Series in Systems Engineering and Management*. John Wiley & Sons, 1992.
- [SBB08] Brian Sauser, Charles Blair, and John Boardman. Systemics : The ultimacy of design. In *Systems, Man and Cybernetics, 2008. SMC 2008. IEEE International Conference on*, pages 24–29. IEEE, 2008.
- [SCC17] Daniel Selva, Bruce G Cameron, and Edward F Crawley. Patterns in System Architecture Decisions. *Systems Engineering*, 19(6) :477–497, 2017.
- [She96] Sarah A Sheard. Twelve systems engineering roles. In *INCOSE International Symposium*, volume 6, pages 478–485. Wiley Online Library, 1996.
- [Shi67] Stanley M. Shinnars. *Techniques of system engineering*. McGraw-Hill Education, 1967.

- [Sil12] Hillary Sillitto. Integrating systems science, systems thinking, and systems engineering : understanding the differences and exploiting the synergies. In *INCOSE International Symposium*, volume 22, pages 532–547. Wiley Online Library, 2012.
- [Sil14] Hillary Sillitto. *Architecting systems : Concepts, principles and practice*. Systems series. College Publications, 2014.
- [Sim69] Herbert Simon. *The Sciences of the Artificial*. 1969.
- [Sim08] Willard Lennox Simmons. *A Framework for Decision Support in Systems Architecting* by. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [Slo12] Arthur L Slotkin. *Doing the Impossible : George E. Mueller and the Management of NASA ?s Human Spaceflight Program*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [Sno00] D. Snowden. Cynefin : a sense of time and space, the social ecology of knowledge management. In C. Despres and D. Chauvel, editors, *Knowledge Horizons : The Present and the Promise of Knowledge Management*. Butterworth Heinemann, 2000.
- [SR99] A.P. Sage and W.B. Rouse. *Handbook of Systems Engineering and Management*. Wiley, 1999.
- [SRE09] Filippo A Salustri, Damian Rogers, and Nathan L Eng. Designing as balance-seeking instead of problem-solving. *Design Principles and Practices*, 3(3) :343–356, 2009.
- [Sto98] Oliviero Stock. *Spatial and temporal reasoning*. Springer Science & Business Media, 1998.
- [Suh90] Nam P. Suh. *The Principles of Design*. Oxford series on advanced manufacturing. Oxford University Press, 1990.
- [Suh01] Nam P. Suh. *Axiomatic Design : Advances and Applications*. MIT-Pappalardo series in mechanical engineering. Oxford University Press, 2001.
- [Suh05] Nam P. Suh. *Complexity : Theory and Applications*. MIT-Pappalardo series in mechanical engineering. Oxford University Press, 2005.
- [SW49] Claude Shannon and Warren Weaver. *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press, Urbana, 1949.
- [TA05] Jeff Tyree and Art Akerman. Architecture decisions : Demystifying architecture. *IEEE Software*, 22(2) :19–27, 2005.
- [The03] The White House, Office of the Press Secretary. Homeland Security Presidential Directive/HSPD–8 : National Preparedness. [https ://georgewbush-whitehouse.archives.gov/news/releases/2003/12/20031217-6.html](https://georgewbush-whitehouse.archives.gov/news/releases/2003/12/20031217-6.html), december 2003.
- [Tho93] Bernhard Thomé. *Systems engineering : principles and practice of computer-based systems engineering*. John Wiley and Sons Ltd., 1993.
- [UDoHS09] Federal Emergency Management Agency (FEMA) U.S. Department of Homeland Security. Target capabilities list user guide, february 2009.
- [Val19] Paul Valéry. Introduction à la méthode de Léonard de Vinci. *La Nouvelle Revue Française*, 1919.

- [VD07] Pieter E. Vermaas and Kees Dorst. On the conceptual framework of john gero's fbs-model and the prescriptive aims of design methodology. *Design Studies*, 28(2) :133 – 157, 2007.
- [vdVJNB06] Jan Salvador van der Ven, Anton GJ Jansen, Jos AG Nijhuis, and Jan Bosch. Design decisions : The bridge between rationale and architecture. In *Rationale management in software engineering*, pages 329–348. Springer, 2006.
- [Ver09] Pieter E. Vermaas. The flexible meaning of Function in Engineering. In *International Conference on Engineering Design, ICED'09*, pages 113–124, 2009.
- [Ver13] Pieter E Vermaas. On the formal impossibility of analysing subfunctions as parts of functions in design methodology. *Research in Engineering Design*, 24(1) :19–32, 2013.
- [VH06] Pieter E. Vermaas and Wybo Houkes. Technical functions : a drawbridge between the intentional and structural natures of technical artefacts. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 37(1) :5 – 18, 2006. The dual nature of technical artefacts.
- [Vit15] Vitruvius. *De Architectura*. -15.
- [Voi18] Jean-Luc Voirin. *Conception architecturale des systèmes basée sur les modèles avec la méthode Arcadia*. ISTE éditions, Londres, 2018.
- [War55] John N Warfield. Systems Engineering. Technical report, Pennsylvania State University, 1955.
- [Wea48] Warren Weaver. Science and complexity. *American scientist*, 36(4) :536–544, 1948.
- [Wie48] Norbert Wiener. *Cybernetics*. J. Wiley, New York, 1948.
- [Wik] Wikipedia. Ingénierie des systèmes. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ingénierie_des_systèmes. accédé le 28 janvier 2018.
- [Wun] Peter Wunderli. Ferdinand de Saussure : synchronie, diachronie, panchronie, dans louis hébert (dir.), signo [en ligne], rimouski (québec). <http://www.signosemio.com/saussure/synchronie-diachronie.pdf>. accédé le 17 février 2017.
- [Wym67] A. Wayne Wymore. *A Mathematical Theory of Systems Engineering*. John Wiley and Sons, 1967.
- [Wym76] A. Wayne Wymore. *Systems engineering methodology for interdisciplinary teams*. John Wiley & Sons, 1976.
- [Wym93] A. Wayne Wymore. *Model-based systems engineering*. CRC press, Inc., 1993.
- [Zac87] John A. Zachman. A framework for information systems architecture. *IBM Systems Journal*, 26(3 IBM Publication G321-5298), 1987.
- [Zac97] John A. Zachman. *Concepts of the Framework for Enterprise Architecture : Background, Description and Utility*. Zachman International, 1997.
- [Zin07] Chaim Zins. Conceptual approaches for defining data, information, and knowledge. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 58(4) :479–493, 2007.
- [ZS92] John A. Zachman and John F. Sowa. Extending and formalizing the framework for information systems architecture. *IBM Systems Journal*, 31(3) :590–616, 1992.

Titre : Une approche paradigmatique de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes

Mots clés : Architecture ; Système ; Conception ; Complexe

Résumé : L'architecture système cherche à se distinguer de son domaine d'origine, l'ingénierie système, en devenant un domaine émergent. Loin d'être reconnue en tant que science ou discipline à proprement parler, sa pratique est de plus en plus répandue de nos jours. Cependant, cette pratique reste encore peu formalisée et peu enseignée, faute d'un corpus de connaissances, de techniques ou de démarches établies et accessibles. Notre thèse contribue à combler ce manque en proposant un paradigme de la conception architecturale des systèmes artificiels complexes. Ce dernier est construit en se basant sur des paradigmes existants, en les combinant, puis en les complétant. Il vise à doter l'architecte de systèmes artificiels complexes d'un cadre opérant, voire performatif. Il se traduit par une structuration de la démarche de conception en quatre niveaux.

Un niveau dit *archétypal* condense les grands principes de toute démarche de conception architecturale de systèmes artificiels complexes. Ces principes sont dérivés de diverses démarches déjà appliquées, principalement à la conception de systèmes ou de produits, mais également à la conception architecturale de bâtiments.

Un niveau dit *général* repose sur le principe d'une partition présent-futur, se différenciant en cela des approches d'ingénierie qui s'appuient traditionnellement sur une dichotomie problème-solution. L'idée prépondérante tient dans

l'assentiment que lorsqu'un architecte conçoit, il ne résout pas de problèmes, mais il imagine des futurs possibles et plausibles, nécessitant qu'il perçoive le présent. Cette vision impacte directement la nature des artefacts sur lesquels il travaille. Nous proposons ensuite d'agrèger ces artefacts en des modèles, reflétant soit sa perception du présent, soit son élaboration des futurs, évoluant suivant des processus identifiés.

Un niveau dit *particulier* a pour objectif de permettre la narration d'une conception particulière. Nous proposons pour cela une notation de la conception. Elle s'appuie sur un certain nombre de mécanismes élémentaires, dont celui de l'enchaînement divergence-convergence, que nous nommons mécanisme de *respiration* de la conception architecturale.

Un niveau dit de *boîte à outils* n'est pas traité dans le cadre de cette thèse. Il comprendrait les différentes opérations cognitives nécessaires à l'architecte pour accomplir sa tâche de conception (abstraction, questionnement, jugement, comparaison, décision, etc.)

L'approche proposée est illustrée par un exemple de conception architecturale d'un système complexe : « rendre une ville plus sûre » (connu dans la littérature anglo-saxonne comme « Safe City »).

Title: A paradigmatic approach of the architectural design of artificial complex systems

Keywords: Architecture; System; Design; Complex

Abstract: Architecting seeks now to be distinct from its original domain, systems engineering, becoming an emergent domain. Far from being recognized as a science or a discipline, its practice is nowadays more and more widespread. However, this practice is still poorly formalized, and insufficiently being taught, lacking a well-established and accessible corpus of knowledge, techniques or approaches. This thesis contributes filling that gap by proposing a paradigm of the architectural design of artificial complex systems. The latter is built based on existing paradigms that are combined, then completed. It aims at providing architects with an effective, even performative framework. It results in an approach of the architectural design structured in four levels.

A so-called *archetypal* level grasps the core principles of any approach of architectural design of artificial complex systems. These principles are derived from various approaches already applied, mainly in the field of system or product design, but also of architectural design of buildings.

A so-called *general* level lies on the principle of a present-future division. In that sense, it differs from engineering approaches that usually rely on a problem-solution dichotomy.

It is based on the following main idea: we should consent that when an architect designs, he does not solve problems, but he devises possible and plausible futures, requiring to perceive the present. This vision of the architect's way of working directly impacts the kind of artefacts he handles. We show how to aggregate these artefacts into models, reflecting either his perception of the present, or his development of futures while progressing through some identified processes.

A so-called *particular* level aims at allowing the storytelling of a given design. To achieve this goal, a notation of the design process is suggested. It lies on some basic mechanisms, one of them being the combination divergence-convergence, called the *breathing* of the architectural design.

At last, a so-called *toolbox* level, not addressed in this thesis, would consist of various cognitive operations required for the architect in order to accomplish his task of designing (abstraction, questioning, judgement, comparison, decision, etc.)

The whole approach is illustrated by an example of an architectural design of a complex system: a *Safe City*.