



Ergonomie théorique de l'humain-machine : quels fondements épistémologiques pour une conception sûre ?

Rémi Nazin

► To cite this version:

Rémi Nazin. Ergonomie théorique de l'humain-machine : quels fondements épistémologiques pour une conception sûre ?. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Lorraine, 2019. Français. NNT : 2019LORR0012 . tel-02142411

HAL Id: tel-02142411

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-02142411>

Submitted on 28 May 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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

ERGONOMIE THÉORIQUE DE L'HUMAIN-MACHINE

Quels fondements épistémologiques pour une conception sûre ?

THÈSE

en vue de l'obtention du titre de Docteur en Ergonomie

par

Rémi Nazin

Thèse soutenue le 15 Janvier 2019

Thèse dirigée par :

- Christian Bastien, Professeur - Université de Lorraine
- Didier Fass, Professeur - ICN Business School

Jury :

- | | |
|---|--------------|
| • Catherine Letondal, Maître de Conférences
École nationale de l'aviation civile | Examinatrice |
| • Didier Bazalgette, Responsable Scientifique SHS
Direction Générale de l'Armement | Examinateur |
| • Brian Gore, Ph.D., Manager for the Human Factors Portfolio
National Aeronautics and Space Administration | Rapporteur |
| • Franck Gechter, Maître de Conférences
Université Technologique de Belfort Montbéliard | Rapporteur |

Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications – UMR7503

Psychologie ERgonomique et Sociale pour l'Expérience UtilisateurS – EA7312

Thèse financée par la Direction Générale de l'Armement, Ministère de la Défense

Remerciements

J'ai beaucoup de difficulté à me considérer comme un aventurier, non que je prenne systématiquement les décisions les plus sûres, loin de là. Toutefois, à la base de mes décisions concernant l'université il me semble y avoir toujours eu un critère fondamental du choix. L'intérêt intellectuel. Aussi, lorsque s'est présentée l'opportunité d'une thèse, je m'estime heureux que ce fut avec ce sujet. A l'origine, je ne m'attendais pas à ce que celui ci me mène où je suis allé, vers des questions fondamentales pour l'ergonomie mais dont la portée dépasse cette dernière.

Il est difficile de préfacier de la sorte son propre travail, aussi serais-je bref. La thèse est une fin mais c'est une exploration. Elle a pour but de transmettre la conviction qu'il existe, là, quelque chose d'intéressant pour la communauté. Comme toute exploration, ce n'est pas parce qu'il s'agit, aujourd'hui, d'en rendre compte qu'elle est terminée. Ainsi, à l'intérêt intellectuel s'ajoute une donnée fondamentale qui est celle de la fécondité des choses. L'on explore peu pour seulement explorer finalement, l'on explore pour agir, pour agir plus et pour agir mieux. Et je pense que cette thèse, entre autres choses, m'a permis d'entreprendre cette voie.

J'ai ainsi beaucoup de monde à remercier.

*
**

J'ai beaucoup lu et entendu qu'il est de convenance de remercier ses directeurs en premier. J'avouerai alors que ce n'est pas la convenance qui me dicte de remercier, les premiers, MM. Didier Fass et Christian Bastien mais bel et bien la gratitude. Le premier au titre de m'avoir proposé ce sujet de thèse et de m'avoir fait confiance quant à ce que j'en ai fait. Le second, pour m'avoir accueilli dans son équipe malgré le caractère étrange de mon

profil et de mon projet, d'autres s'en sont gardés je n'y ai rien perdu. Tous deux ont été précieux durant ces quatre années à bien des égards. Ils ont su doser savamment le rapport délicat entre liberté et exigence et ont ainsi permis de canaliser ma réflexion parfois disparate dans ce manuscrit.

De la même manière que cette thèse ne se serait faite sans direction, elle n'aurait pu exister sans financement. Mais j'aimerais remercier M. Didier Bazalgette à d'autres égards également. Je me sens honoré de son soutien qui permet l'attribution de ma bourse DGA mais je suis plus encore plus reconnaissant de sa bienveillance et de sa confiance attentive concernant les aspects scientifiques de mes travaux.

À M. Brian Gore je suis reconnaissant d'avoir permis que je visite les installations de la NASA au Ames Research Center. Si une grande part de cette thèse est abstraite, avoir pu utiliser MIDAS m'a permis d'avoir des perspectives autrement plus pertinentes sur le sujet. Je le remercie également d'avoir accepté de rapporter cette thèse.

À Mmes Dominique Macaire et Cécile Bertrand-Dagenbach je suis redevable de leur confiance également. Mais ce dont j'aimerais les remercier c'est d'avoir été accessibles et ouvertes à ce projet et à ses spécificités ainsi que d'avoir réussi à faire de l'ED Stanislas une administration humaine.

**
**

À Mmes Martine Kuhlmann, Delphine Hubert, Christelle Levêque et Aude Mougenez. Car il me paraît salvateur, ici, de remercier celles et ceux qui sont à mes yeux l'un des piliers centraux de toute recherche et qui sont les personnels administratives que j'ai côtoyées durant ma thèse. Comme l'on va le voir dans cette thèse, il y a toujours une dimension sociotechnique dans les choses, l'administratif en est l'une des composantes et c'est, bien sûrement, celle qui m'effraie le plus.

Au LORIA, et à tous ceux que j'y ai fréquenté, aussi bien à mes collègues chercheurs qu'aux personnels de la cantine et de la cafeteria et aux autres personnels administratifs. Bien qu'au départ *outsider* je ne m'y suis pas senti exclu et c'est avec joie que j'y pense comme *mon* laboratoire.

A mes collègues de PERSEUS, que j'ai trop peu vus mais qui m'ont tout de même accueilli et dont j'espère croiser la route dans le futur.

À mes ami(e)s de Par(en)thèse, en particulier à Livia et Nanou, pour avoir supporté ma présence et l'occupation du local lors de cette quatrième année. J'y ai appris des choses, des quantités de chose même.

À ma famille et mes autres amis, essentiellement pour avoir compris très vite que la question : "comment ça va la thèse ?" ne se pose pas.

*

**

ENFIN, j'aimerais présenter mes plus profonds remerciements à tous les membres du jury. La composition de celui-ci est source de fierté. Ce jury représente bien la complexité du public à qui s'adresse ma démarche, il ne s'agit pas de faire une "philosophie pour ingénieurs" ou de vouloir donner des leçons mais d'entamer un dialogue interdisciplinaire afin de permettre l'action conjointe des spécialistes.

Ainsi, la présence de M. Brian Gore en qualité de rapporteur m'est particulièrement précieuse dans la mesure où sa qualité de spécialiste des facteurs humains dans le projet MIDAS fait de lui un interlocuteur des plus privilégiés concernant mes propositions de modélisation de l'interaction.

La présence de M. Franck Gechter en tant que rapporteur me réjouit également car l'intelligence artificielle est une dimension importante de l'usage et de la manière dont l'humain cohabite un monde avec les machines.

Je remercie Mme. Catherine Letondal pour avoir accepté d'être examinatrice pour cette thèse, ses recherches sur les interfaces tangibles et la construction d'objets augmentés lui offrent une perspective importante concernant mon travail et mes propositions.

Je remercie M. Didier Bazalgette d'avoir accepté d'être examinateur, il s'est avéré être, au fil des ans, un observateur précieux des mes travaux et je me réjouis de pouvoir, enfin, lui présenter.

Je conclurai en remerciant encore MM. Christian Bastien et Didier Fass de leur présence, de leur patience et de leurs conseils.

Table des matières

Introduction	21
Première partie Épistémologie de l'interaction	41
1 Conception des Interfaces Homme-Machine	45
1.1 Ingénierie des systèmes techniques	47
1.2 La conception intégrative des systèmes humain-machine . .	55
2 Concepts et Fonctions	61
2.1 Sur la notion de concept	61
2.1.1 Notion, concept, textualité	61
2.1.2 Concept et conception	66
2.1.3 Historicité et étude des concepts	67
2.2 Le concept de fonction	70
2.2.1 Aspects lexicographiques	70
2.2.2 Le tournant moderne	76
2.2.3 Biologie et fonctions	78
3 État de l'art : Analyse conceptuelles des trois concepts de l'IHM	89

3.1	L'Humain	90
3.1.1	Le behaviorisme : un point de départ commun . . .	91
3.1.2	Cybernétique et cognitivisme : retour au rationalisme	94
3.1.3	Proposition d'une alternative	103
3.2	La Machine	105
3.2.1	Histoire succincte de la machinité	105
3.2.2	Simondon et l'individu technique	108
3.3	L'Interaction	123
3.3.1	Historicité d'une notion contemporaine	123
3.3.2	Analyse épistémologique	131
 Deuxième partie Vers une ontologie de conception		151
4	Ontologie de conception	155
4.1	Le framework intégratif	157
4.1.1	Classes de significativité	157
4.1.2	Interactions fonctionnelles	159
4.2	Critères de Scapin et Bastien	163
4.2.1	Présentation	163
4.2.2	Analyse	165
4.2.3	Aspects intégratifs de la critériologie	190
5	Proposition pour une critériologie	195
5.1	Rationales	196
5.2	Définitions	198
5.3	Critériologie	201
6	MIDAS	209

6.1	Présentation	210
6.2	Le modèle hybride IMPRINT / ACT-R	211
6.3	Le modèle MIDAS/A-SA	213
6.4	Exemple de mise en place	226
6.5	Bilan	229
 Conclusions		 235

Liste des figures

1	Le cycle de conception utilisateur, d'après la norme ISO 9241-210 : 2010. Ergonomics of human system interaction- Part 210 : Human-centred design for interactive systems . .	26
1.1	Le cycle de conception logicielle en cascade	51
1.2	Le cycle de conception en V	52
1.3	Le cycle de conception en spirale	53
1.4	L'expérience utilisateur	54
3.1	<u>Dépendances épistémologiques des traditions liées à l'hylémorphisme</u>	142
3.2	<u>Dépendances épistémologiques des traditions liées au matérialisme</u>	143
3.3	Cadre de conception intégratif	145
4.1	Classes de significativité	160
4.2	Liens entre la critériologie de BASTIEN et SCAPIN et le cadre de conception de FASS.	192
5.1	Structure logique de l'interface humain-machine.	208
6.1	Méthode de développement basée sur les méthodes formelles	223

Liste des tableaux

1.1	Complexité dans les systèmes sociotechniques	48
3.1	Catégories de la pensée chez KANT (1787)	101
3.2	Grille comparative des différentes anthropologies scienti- fiques du XX ^{ème} siècle.	106
4.1	Classification des modes d'interaction en fonction du couple {Source,Puits}	162
4.2	Paramètres intégratif permettant l'analyse d'une IHM . . .	191

Abbreviations

NOTATIONS LOGIQUES

Nous avons choisi, par convention, d'adopter dans cet ouvrage le système de notation le plus couramment utilisée en langue française pour la logique propositionnelle. Le propos de cet ouvrage n'étant pas de faire une philosophie de la logique, le lecteur pourra consulter QUINE (1950) ou d'autres ouvrages pour aller plus avant sur le sujet.

Symbole	Alternatives	Nom	Signification
$\top$	1	: Vrai	
$\perp$	0	: Faux	
$\wedge$	•	: Et	$X = p \wedge q$ n'est vraie que lorsque p et q sont vraies.
$\vee$	+	: Ou	$X = p \vee q$ n'est fausse que lorsque p et q sont fausses.
$\neg$	$\bar{p}, \sim$	: Non	$X = \neg p$ est vraie lorsque p est fausse.
$\rightarrow$	$\supset$	: Implication matérielle	$X = p \rightarrow q$ n'est fausse que lorsque p est vraie et q est fausse.
$\leftrightarrow$	$\equiv$	: Double implication	$X = p \leftrightarrow q$ n'est vraie que lorsque p et q ont la même valeur.
$\vdash$		: Dédution	$p \vdash q$ signifie que si l'on suppose p vraie alors q est également vraie.
$\square$		: Nécessaire	$X = \square p$ est toujours vraie.
$\diamond$		: Contingent	$X = \diamond p$ peut être fausse.

Il est à noter que les variations symboliques désignées ici ne proviennent pas de coquetteries typographiques de la part de leurs auteurs. Les variations de symbole représentent des divergences de signification selon les auteurs, ainsi la différence entre $\rightarrow$ et $\supset$ tient au fait que la première se fonde sur la notion d'implication matérielle tandis que la seconde est fondée sur la théorie des ensembles.

DICTIONNAIRES

- **Lalande** renvoie à SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHILOSOPHIE (1926)
- **Académie** renvoie à ACADÉMIE FRANÇAISE (1935)
- **Gaffiot** renvoie à GAFFIOT (1934)
- **Bailly** renvoie à BAILLY (1895)
- **Ernout et Meillet** renvoie à ERNOUT et MEILLET (1932)

CITATIONS

On trouvera, pour les sources étrangères, la citation du texte original accompagnée de la citation d'une traduction française. Par souci de justesse, nous avons choisi de citer les ouvrages étrangers dans leur langue d'écriture et, par conséquent d'utiliser les dénominations originelles de leurs auteurs. Toutefois, par commodité pour le lecteur, nous avons choisi de franciser volontairement le nom des auteurs antiques grecs.

« Syllogismus ad principia scientiarum non adhibetur, ad media axiomata frustra adhibetur, cum sit subtilitati naturae longe impar. Assensum itaque constringit, non res. »

BACON, *Novum Organum*, 1620

Introduction

Introduction

LA conception sûre des systèmes humain(s)-machines(s) nous oblige aujourd'hui à repenser les méthodes et les modalités de leur conception ainsi que notre manière de représenter les relations entre l'humain et la machine. Cette problématique pluridisciplinaire intéresse aussi bien le scientifique, l'ingénieur et l'ergonome.

Les limites entre sciences de l'interaction, ingénierie système et ergonomie de conception s'estompent et il convient de repenser les concepts et principes théoriques unifiant ces trois approches de la technique. L'enjeu de notre travail de thèse est de concevoir une ergonomie théorique à partir d'une épistémologique pragmatique pour la conception sûre des systèmes humain-machine.

L'ergonomie, est, selon l'Académie, dans son sens purement étymologique d'étude des lois du travail humain. C'est devenu un terme polysémique qui recouvre et regroupe des réalités diverses telles que l'organisation humaine du travail, l'adaptation de postes de travail ou encore certains aspects de la conception d'objets. Dans son acception historique la plus ancienne, elle correspond à ce que l'on nomme aujourd'hui ergonomie de correction dont on trouve un exemple canonique dans l'adaptation des postes de travail aux spécificités de l'utilisateur, en vue de limiter les accidents et maladies professionnelles.

Cette première approche a ensuite contribué à l'émergence d'une ergonomie de conception dont la nouveauté a été de se concentrer sur les considérations liées à l'usage à l'intérieur de la conception primaire des systèmes techniques, donc au delà de leur mise en œuvre. Cela correspond à la définition fournie par l'INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION (2017) : "L'Ergonomie (ou facteurs humains) est la discipline

scientifique dédiée à la compréhension des interactions entre l'humain et les autres composants d'un système ainsi que la profession qui applique des théories, principes, données et méthodes à la conception afin d'optimiser le bien-être humain et les performances générales du système.”¹.

¹ Notre traduction.

Enfin BRANGIER et ROBERT définissent l'ergonomie de prospection comme une ”modalité d'intervention ergonomique qui consiste à détecter des besoins actuels et anticiper de futurs besoins, et à créer des systèmes, produits ou services qui satisfont ces besoins selon des critères de santé et sécurité, confort et bien-être, performance et satisfaction.(2014)”.

*
**

LA capacité de concevoir et designer efficacement des systèmes humain-machine est un enjeu fondamental comme le rappelle la Direction Générale de l'Armement² (2017). Si l'on entend le terme de ”machine” comme un système technique complexe dont le numérique et les outils industriels ne sont que des cas particuliers, les enjeux futurs liés à l'intégration humain-système technique, considérée comme une maîtrise de l'ensemble des interactions entre l'objet technique et ses utilisateurs, sont nombreux.

² Abrégé en DGA.

La DGA (2017) mentionne entre autres :

• En aéronautique :

- L'autonomie décisionnelle et les nouvelles interfaces humain-machine
- L'aide au pilotage par faible visibilité

• Dans les systèmes terrestres :

- Le renforcement du combat collaboratif
- Les apports de la robotique
- Les techniques nécessaires au partage et à la valorisation de l'information disséminée, localisation précise ami/ennemi

• En ingénierie de l'information et en robotique

- L'intelligence embarquée, distribuée

- l'autonomie augmentée
- L'aide à la décision
- Les outils pour l'entraînement ou la simulation

De plus, si l'on considère que l'ergonomie de conception et l'ergonomie prospective prennent leur sens dans les études et les dispositifs techniques qui possèdent une forte dimension duale en sus de l'intérêt défense, il est aisé de considérer que le domaine des enjeux liés à l'intégration humain-système déborde énormément ces besoins de défense dans l'industrie, l'aéronautique civile, le médical,

Dès lors, la conception sûre et le développement maîtrisé de ces systèmes humain(s)-machines(s) est un enjeu majeur pour l'ensemble de la société et spécialement dans les domaines critiques comme les domaines militaire, aérospatial et médical qui sont amenés à évoluer conjointement grâce aux progrès réalisés par l'automatisation. Parallèlement, les techniques disponibles pour assurer la mise en place de solutions répondant à ces besoins sont également en constante progression concernant leurs dimensions de puissance, efficacité énergétique, miniaturisation, ce qui correspond à la notion de convergence Nanotechniques-Biotechniques-Informatique-Sciences Cognitives inaugurée par ROCO et BAINBRIDGE (2002).

Toutefois, l'automatisation n'est pas nécessairement synonyme d'autonomisation ce qui exclut, à l'heure actuelle, que la conception des systèmes humain-machine soit une "pure ingénierie" qui puisse faire l'économie des utilisateurs. Dans de nombreux domaines, l'utilisateur demeure nécessaire soit parce que le système lui rend un service soit parce qu'une supervision demeure nécessaire.

Cette convergence NBIC et cet augmentation de la dépendance à la technique engendrent des systèmes sujets à de nouvelles fragilités (couverture satellitaire, gestion de l'énergie, sûreté des logiciels....) en raison de l'accroissement de leur complexité interne. Cela implique que les méthodes d'analyse et de design issues de l'ergonomie puissent prendre en charge toutes ces évolutions techniques permettant ainsi de gérer l'évolution des exigences des systèmes humain-machine et ainsi les spécifier en anticipant leur utilisation, tant en opération qu'en maintenance, afin d'imaginer les nouveaux bénéfices et les nouveaux risques qu'ils apportent.

**

³ Human Factors Engineering (HFE) en anglais.

Du point de vue d'ingénierie systèmes, on peut considérer l'ingénierie des facteurs humains³ comme la discipline qui met en place des démarches, méthodes et outils de l'ergonomie de conception en vue de produire des systèmes humain-machine.

LOCKETT et POWERS (2003) recensent six méthodes générales utilisées afin de mettre en œuvre l'ingénierie des facteurs humains :

- L'étude de temps et mouvements, qui décompose l'utilisation d'un système en différentes tâches et chronomètre leur réalisation tout en répertoriant les gestes utilisés.
- L'analyse des liens et Diagramme des Séquences Opérationnelles qui permet d'étudier les liens entre différentes tâches.
- L'analyse des tâches, fonctions et charge de travail.
- L'accidentologie qui permet de comprendre les raisons des défaillances non prévues d'un système.
- Les études anthropométriques et biomécaniques qui fournissent des données importantes pour la compatibilité physique des systèmes techniques.
- Les études d'utilisabilité qui permettent de valider ou réfuter des hypothèses de conception ou bien de diagnostiquer des problèmes liés à l'usage d'un dispositif.

De même, LOCKETT et POWERS (2003) distinguent cinq classes d'outils pour l'ingénierie des facteurs humains :

- Lignes directrices et normes.
- Checklists.
- Outils de retour d'expérience.
- Simulations humain hors boucle.
- Simulation humain dans la boucle.

Bien évidemment, tous ces outils et méthodes ne s'excluent pas mutuellement et nécessitent généralement d'être utilisés de façon complémentaire. Ce qu'ils ont en commun est leur profond caractère empirique lié au retour d'expérience, qui est par nature plus ou moins formalisable. Dès lors se pose le problème d'une intégration plus importante et plus systématique de l'ergonomie de conception au sein de l'ingénierie systèmes à travers une axiomatisation, c'est à dire ici l'établissement d'un ensemble de règles et de lois régissant l'intégralité du domaine des systèmes humain-machine qui ne soit pas justifié de façon inductive.

Actuellement la démarche que l'on appelle *conception centrée utilisateur* ou la *conception centrée sur l'humain*, est définie par la norme (ISO 9241-210 : 2010. *Ergonomics of human system interaction-Part 210 : Human-centred design for interactive systems*, 2009), régit une grande partie de l'ergonomie de conception et particulièrement la certification des dispositifs techniques. Il y a toutefois une différence majeure entre certifier un système et certifier l'usage de méthodologies. En effet, si, pris isolément, les méthodes et outils ont une efficacité et une pertinence indéniable au sujet de l'utilisabilité d'un système, leur bon usage ne garantit aucunement la sûreté de ce système.

La démarche de *conception centrée sur l'humain* repose sur la notion de conception itérative, c'est à dire sur l'idée que le design peut se structurer selon un algorithme qui va produire des spécifications à partir des exigences issues de l'analyse de l'utilisation du dispositif. Ainsi, ce mode de conception repose sur la répétition de cycles, tels que celui représenté dans la figure 1⁴ et dans lequel l'évaluation d'un prototype conduit soit à la validation d'hypothèses soit à la modification des exigences.

⁴ Voir p 26.

Cette méthode de conception est fortement conditionnée par l'analyse initiale ainsi que celles fournies par les évaluations ce qui en fait une approche proprement expérimentale. Le point faible de cette démarche est qu'elle permet uniquement de valider ou de réfuter les hypothèses testées. Or, l'expérimentation ne peut, par définition, jamais être exhaustive et les conclusions de ce mode de conception doivent alors toujours être relativisées en fonction d'un contexte précis ainsi que des données initiales du problème.

Tout cela rend donc nécessaire d'avoir une ergonomie théorique, non pas au sens parfois entendu d'un détachement de la pratique mais au sens

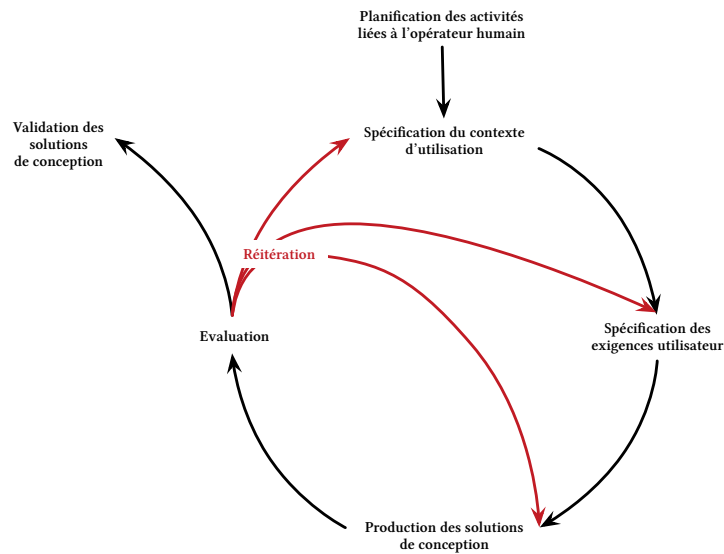


FIG. 1 : Le cycle de conception utilisateur, d'après la norme ISO 9241-210 : 2010. Ergonomics of human system interaction-Part 210 : Human-centred design for interactive systems

d'une ergonomie fondée sur un cadre conceptuel et formel permettant de rendre intelligibles les méthodologies et normes utilisées à travers des principes généraux. Actuellement, y compris en ergonomie cognitive, ce cadre formel n'existe pas, bien que des travaux comme ceux de SCAPIN et BASTIEN (1997) sur les critères d'évaluation des IHM, fondés sur une démarche expérimentale, ou les heuristiques de MOLICH et NIELSEN (1990) qui ont tenté d'effectuer des synthèses des connaissances pratiques en ergonomie existent.

Au delà de la simple réflexion d'ordre théorique ou pratique sur les méthodes et leurs implications, l'épistémologie impose d'analyser les fondations des sciences, que celles ci fussent idéologiques ou conceptuelles. Appliqué à nos problèmes, cela signifie analyser les fondations conceptuelles des méthodes et doctrines scientifiques utilisées et utilisables pour modéliser et comprendre l'humain dans ses relations avec les systèmes techniques.

Ainsi, l'ergonomie théorique telle que nous la concevons n'est pas une théorie de l'ergonomie mais une théorie de l'anthropotechnique, qui cherche à développer une méthodologie et une épistémologie pragmatique, propre à apporter les fondements conceptuels à ce qui existe aujourd'hui et à permettre le développement futur de l'ergonomie comme

champ scientifique. Ce que l'on appelle *complexe anthropotechnique* est tout objet, qui se compose d'une partie qui est un être humain et d'une autre qui est un système technique, que l'on considère comme une individualité au sens que SIMONDON (1958) donne à ce terme, celui d'être une unité d'action qui possède un milieu associé qu'il intègre dans son fonctionnement. En cela, il y a déjà intégration dans la mesure où concevoir un système anthropotechnique consiste à faire *comme si* l'on concevait l'utilisateur humain comme une partie technique de l'ensemble et non pas comme un objet préalablement extérieur auquel est censé se coordonner le système, ce qui constitue le paradigme actuel des systèmes humain-machine.

*

**

Le paradigme actuel de l'IHM est hérité de l'industrie et inspiré de la psychologie cognitive. Il se structure autour de la dualité {opérateur | machine}⁵ qui repose sur une communication asymétrique, l'opérateur émettant des instructions afin de modifier le fonctionnement de la machine⁶. L'automatisation tend à modifier radicalement ce rapport à la machine, l'interaction n'est plus conçue sous le rapport *action* $\Rightarrow$ (*réaction* + *information*) mais entre l'opérateur et une machine proactive aboutissant par là à un système de deux objets en *interréaction* ; c'est à dire que tout se passe comme si l'humain et la machine devenaient opérateurs l'un de l'autre.

De façon complémentaire, l'humain est aujourd'hui réduit à un être cognitif, computationnel et symbolique désincarné et ce qui se veut une réduction demeure finalement une conception dualiste de l'humanité⁷. La question classique de cette dualité du corps et de l'esprit n'est finalement aujourd'hui que substituée par un dualisme du corps et du cerveau dont l'esprit serait une sorte de système d'exploitation, ce qui constitue un héritage de l'automatique et de la cybernétique de WIENER (1948).

Il y a donc une nécessité impérieuse de repenser les notions même d'humain et de machine pour en faire émerger celle de *complexe anthropotechnique*. Pour cela, il convient d'adresser deux paradoxes fondamentaux ;

- L'informatisation des systèmes humain(s)-machine(s) n'induit pas leur séparation mais complexifie profondément leur cointégration.

⁵ Dualité qui a elle-même évolué dans l'histoire vers moins d'opération et plus de supervision.

⁶ Le modèle paradigmatique de cette conception se trouve dans l'automobile avec l'accélérateur qui commande le mélange air/carburant dans le moteur permettant ainsi d'influencer directement le régime du moteur.

⁷ Doctrine que l'on retrouve chez DESCARTES (1641) et qui soutient que le corps et l'esprit sont deux substances distinctes.

⁸ Les modèles des ingénieurs selon la définition de KANT (1787).

⁹ Les connaissances expérimentales pour HUME (1793).

- La conception sûre des systèmes humain(s)-machine(s) doit à la fois dériver de connaissances analytiques *a priori*⁸ et de connaissances synthétiques *a posteriori*⁹.

Ce que l'on appelle *a priori* et *a posteriori* concerne ici une façon d'articuler et de produire les connaissances que l'on a sur le monde. Cette dénomination concerne la division que l'on fait entre l'ordre des choses et celui des raisons. On dira d'une explication qu'elle est *a priori* si elle suppose que la description qu'elle fournit est issue du développement d'une série causale à partir d'une prémisse déterminée. Cette explication fonctionne sur la base de règles acceptées de laquelle on fait dériver un état supposé final du phénomène de cette prémisse. *A contrario*, une explication est dite *a posteriori* si elle prend comme point de départ l'état supposé final du phénomène afin d'en remonter par hypothèses successives et complémentaires à son état initial.

Sans comprendre cela il est inconséquent de vouloir réunir les méthodes ingénieriales du design, fondées sur les preuves formelles et calculatoires donc *a priori*, et celles *a posteriori* des sciences du vivant depuis BERNARD (1865), nécessitant la mise en évidence de preuves factuelles¹⁰, sans se résoudre à les juxtaposer simplement.

¹⁰ On se heurte par ailleurs ici à un premier problème lexical d'envergure dans la mesure où le français traduit par *preuve* les anglicismes *proof* et *evidence* qui caractérisent ces divergences dans la justification.

*
**

Avec les systèmes critiques dans lesquels l'humain intervient, systèmes pour lesquels une défaillance est susceptible d'entraîner des décès humains et/ou de graves conséquences matérielles et environnementales, ces problèmes s'accroissent dans la mesure où il est nécessaire de trouver un compromis adéquat entre support-vie et support opérationnel tout en conservant, voire en parfaissant, les performances du système.

On voit bien en quoi ce compromis entre technocentrisme et anthropocentrisme n'en est pas un. En effet, sacrifier l'un de ces deux domaines au profit de l'autre ne serait aucunement une amélioration du système. Se concentrer uniquement sur la technique constituerait en effet un renoncement difficilement acceptable à la sécurité des utilisateurs et se concentrer uniquement sur le support-vie conduit à des limites dans l'utilité même du système. En sus, l'automatisation et l'autonomisation nous imposent de repenser la place de l'opérateur humain dans la boucle. Cela passe par le renoncement à la notion même d'opérateur telle qu'on

l'a utilisée historiquement. Par exemple, le porteur d'un pacemaker est en effet moins un opérateur que le médecin qui l'a implanté ou celui qui le contrôle mais c'est lui qui, concurremment, va entrer dans une profonde relation de coexistence avec ce dispositif. Dès lors, la notion d'opérateur devient caduque dans ces cas, ce qui impose de la réformer pour le cas général¹¹.

Résoudre ce problème dans la pratique nécessite de réformer notre compréhension des complexes anthropotechniques pour dépasser la dialectique {opérateur | machine} en la repensant dans la perspective d'une intégration {humain - technique} qui est en réalité une intégration {système-système}. Ce que ce système a de particulier est qu'il met en œuvre deux types d'hyposystèmes¹², un système technique et un système biologique. Une solution à ce problème peut se trouver dans le réductionnisme le plus naïf qui consiste à considérer l'humain comme un système technique¹³ mais cette approche pose le problème de l'évidente disparité entre ces deux types d'objets que sont un être vivant et une machine tant au niveau de la finalité, comme le notait déjà CANGUILHEM (1952) ou, et c'est d'une grande importance pour la suite de cette thèse, comme le montrent CHAUVET (1995) et FASS (2002), FASS et CHAUVET (2006) entre deux types particuliers d'organisation.

D'une certaine manière, tant que l'on s'en tient à des considérations de biomécanique ou d'anthropométrie pures, tout se passe relativement bien pour la simple raison que certaines dimensions des deux classes de systèmes sont afférentes aux mêmes disciplines¹⁴. Cette afférence existe malgré la différence d'organisation entre un être vivant et un système physique que pose CHAUVET (1995) comme une différence d'organisation fonctionnelle reposant sur une relativité d'échelle spatiale et temporelle. Ainsi, à certains niveaux d'échelle, l'organisation du système vivant lui octroie des propriétés mécaniques bien qu'à des niveaux d'échelles inférieures les phénomènes en jeu soient fondamentalement biologiques¹⁵. Ce qui caractérise ici le vivant n'est alors pas sa finalité dans la mesure où l'on considère un système équi-final¹⁶ en équilibre métastable dont l'organisation repose sur un mode d'interaction spécifique qui est appelé *interaction fonctionnelle*.

On arrive toutefois bien vite à des difficultés, sitôt que l'on s'intéresse aux aspects comportementaux ou cognitifs de la partie humaine.

¹¹ En effet, une définition n'est qu'une loi humaine et ne vaut donc qu'à la stricte condition qu'elle soit universelle.

¹² Du grec ὑπο (*inférieur*) qui correspond à système réduit à l'intérieur d'un système plus étendu. *A contrario* on appellera hypersystème (de ὑπέρ, *supérieur*) le système de niveau supérieur à celui que l'on considère.)

¹³ Ou bien l'inverse, ce qui est déjà plus difficile conceptuellement.

¹⁴ e.g. la mécanique newtonienne ou la géométrie euclidienne

¹⁵ Ainsi on peut considérer l'os comme un objet mécanique au niveau d'échelle macroscopique du conducteur d'une voiture mais cela n'exclut pas que l'on soit obligé de le considérer comme un tissu vivant à l'échelle cellulaire ou à celle de la circulation sanguine.

¹⁶ Chez L. BERTALANFFY (1968) un système est équi-final s'il peut atteindre un état final donné à partir de plusieurs états initiaux différents et selon différentes évolutions.

L'analogie est alors bien en peine de fonctionner efficacement et l'on retrouve la situation actuelle des Sciences Cognitives appliquées dans lesquelles l'humain est considéré comme une machine de TURING (1936) ou de von NEUMANN (1945) dans lesquelles la séparation machine-code est analogue au dualisme. Or, un ordinateur ne correspond pas à ce que l'on peut observer de l'humain réel sur bien des points, notamment au niveau anatomo-physiologique. Pour d'aucuns, comme KURZWEIL (2005) ce hiatus n'est qu'une faillite quantitative et temporaire de nos Sciences de l'humain. Pour d'autres, comme DREYFUS (1972) ou SEARLE (1980) et dont nous faisons partie, l'être humain n'est pas un ordinateur incompris mais un être vivant doté de propriétés d'organisation et de modes de comportements propres. De telles différences dans l'anthropologie sous-jacente à une pratique scientifique vont nécessairement influencer cette dernière et, par suite, les théories qu'elle va supporter. Par conséquent, l'analyse épistémologique est nécessaire ici, dans la mesure où elle permet de comprendre et d'objectiver l'extension des concepts utilisés par une pratique scientifique donnée et ainsi de ne pas perpétuer certaines analogies problématiques, comme celle du cerveau et de l'ordinateur.

On reprendra la définition de l'épistémologie faite chez Lalande (1926) qui la pose comme l'« étude critique des principes, des hypothèses et des résultats des diverses sciences, destinée à déterminer leur origine logique, leur valeur et leur portée objective ». Il n'est alors aucunement question de se concentrer sur la dimension proprement personnelle de la connaissance humaine, qui est l'objet de ce que l'on nomme gnoséologie. Il est par contre question, sans faire véritablement de philosophie, d'en utiliser certaines conclusions et concepts pour l'ingénierie et l'ergonomie de conception des systèmes humain-machine. La caractérisation de ces concepts et de ce qui les sépare permet, de plus, d'envisager, à partir du cadre de conception développé par FASS (2012) et des principes d'organisation de l'interaction de SCAPIN et BASTIEN (1997), une manière de décrire objectivement les différents aspects de l'*expérience utilisateur* considérée comme l'ensemble des événements de différents types qui se manifestent lors de l'utilisation d'un système technique par un individu humain.

*

**

POURQUOI vouloir comprendre la relation de l'humain à la machine autrement que par les théories aujourd'hui utilisées ?

Les relations de l'humain avec son environnement peuvent prendre de multiples formes tant physiques que logiques¹⁷ et l'étude de l'une d'entre elles ne saurait se faire à l'exclusion de toute autre, en cela que ces relations sont elles mêmes interconnectées. Cette mise au point peut paraître pessimiste et restrictive pour les Sciences de l'humain mais il n'en est en fait rien dans la plupart des cas. L'interdisciplinarité est en effet rendue nécessaire par les besoins pratiques de la conception et se retrouve généralement dans les fondements théoriques des différentes disciplines, ne serait-ce qu'à titre implicite¹⁸. S'ensuit que l'anthropologie guide nécessairement la production du savoir, car toute prise de position sur la nature de l'objet « Humain » et de ses propriétés essentielles va conditionner l'étude des relations entre l'*humain comme phénomène*, c'est à dire en tant qu'il nous apparaît dans son aposteriorité et, donc, comme il est étudiable au contraire de l'Humain comme apriorité et substance¹⁹, et les choses avec lesquels il interagit.

L'être humain, comme tout animal, n'interagit pas uniquement avec des artefacts ou ce que l'on pourrait appeler des artefactoïdes²⁰, c'est à dire des choses possédant une relative autonomie mais également avec d'autres êtres vivants ainsi que des phénomènes physiques comme la gravité. Il interagit également énormément avec des abstractions, que cela soit à travers le langage ou bien des représentations intellectuelles comme l'"idée du triangle", ce qui a énormément conditionné notre définition courante de l'être humain. C'est ainsi que notre anthropologie commune se fonde sur la nomenclature de Linné (1793) qui introduit l'épithète *sapiens* pour définir la classe du genre *homo* à laquelle l'être humain appartient. Le fait de nommer les choses n'est jamais anodin et ce cas ne fait pas exception. L'Académie, à la suite de la tradition²¹, définit la sagesse comme la sagesse issue de la connaissance livresque et les traits intellectuels qui lui sont associés. On retombe alors sur le critère traditionnel de l'humanité dans la tradition chrétienne, qui est la capacité d'acquérir la connaissance des enseignements bibliques.

La postérité, avec la mémoire sélective qu'on lui connaît, a dépouillé la sagesse de ses atours mystiques pour n'en conserver que la faculté de jugement²², c'est à dire la capacité de distinguer le positif du négatif. L'*homo sapiens* devient alors *homo eligentis* et reste défini comme appartenant à l'espèce qui possède la liberté de l'arbitre, pouvant choisir de manière absolument indéterminée entre les deux termes d'une alternative.

¹⁷ On reviendra plus tard sur le sens que nous donnons à ces termes.

¹⁸ On trouvera un exemple flagrant d'interdisciplinarité plus ou moins implicite en étudiant les relations entre Psychologie, Médecine et Biologie à l'époque de la naissance de la psychologie expérimentale chez JAMES (1884) ou chez WUNDT (1874).

¹⁹ En d'autres termes, tel qu'il doit être défini pour des raisons extérieures à la connaissance empirique

²⁰ Une pierre ou un arbre sont des artefactoïdes, des choses naturelles à qui l'on peut attribuer le statut d'artefact en raison de son usage technique possible.

²¹ Gaffiot (1934) traduit *sapiens* par "intelligent, sage, raisonnable, prudent" qui caractérisent l'intelligence humaine dans le monde classique.

²² Sur ce point voir KANT (1790)

Dès lors, la notion de sagesse s'est trouvée rabattue sur la notion de cognition, dans laquelle elle a été engloutie corps et biens. *Homo eligentis* devient alors *homo cogitens* dans la mesure où la capacité de choix devient produit du raisonnement. Le temps ayant la capacité de changer des croyances en faits, ces dénominations sont devenues *mutatis mutandis* véritablement interchangeables et tout semble aller pour le mieux. Les Sciences Cognitives sont alors les mieux placées pour étudier l'humain, ce singe savant, en raison de l'analogie faite, dès 1948, par WIENER (1948) entre les neurones et les relais électroniques qui lui permet de construire la métaphore de l'esprit comme algorithme.

Tout semble donc aller pour le mieux mais les problèmes anciens ont la vie dure. Toute tradition scientifique en tant qu'elle est une idéologie²³ vient avec une anthropologie²⁴. Considérer l'humain sous l'angle cognitif est consistant avec sa qualité d'*homo sapiens*, en cela on étudie ce qui le distingue du reste du règne animal.

Considérer l'humain sous l'angle cognitif induit un biais, dans la mesure où, ce faisant, on perpétue le dualisme présent dans l'acception originelle d'*homo sapiens*. Ce dualisme tient à la séparation entre un corps physique et un esprit qui possède la faculté du jugement, ce qui demeure dans les approches basées sur la résolution de problème. Dans cette conception, la relation de l'individu à son environnement est en fait un ensemble de décisions prises de manière spontanée sur un modèle dérivé du libre arbitre cartésien auquel on aurait retiré la volonté.

Alors, les raisons d'un acte quelconque ne peuvent être trouvées dans une quelconque relation entre l'individu et l'environnement mais doivent plutôt être perçues comme de simples émanations de la pensée de cet individu, l'environnement ne fournissant qu'un contexte propice à une décision en réalité indépendante des événements et le corps n'étant qu'une source d'intrants et d'extrants²⁵. On crée ainsi une boîte noire dont on cherche à lier les états d'entrée aux états de sortie.

Le cognitif semble alors ne pas constituer le bon angle d'attaque pour l'étude de l'humain. Il faut toutefois prendre garde ; affirmer cela ne revient aucunement à nier toute dimension cognitive de l'activité humaine mais plutôt à affirmer qu'elle est complexe et irréductible à un simple ensemble de décisions indépendantes de l'environnement et de la corporéité. Cela revient plutôt à affirmer avec Diogène²⁶ que la

²³ En tant qu'ensemble cohérent d'idées.

²⁴ Au sens d'une conception de la nature de l'humain.

²⁵ En d'autres termes un ensemble de capteurs et d'effecteurs.

²⁶ Diogène de Synope, cité par DIOGÈNE LAËRCE (p. d.)

définition de l'humain comme bipède rationnel sans plume est insuffisante et inopérante. et préciser qu'il dispose d'ongles plats ne change rien à l'affaire, aujourd'hui comme alors.

*
**

Il semble toutefois que la Science ne s'embarrasse guère de tels questionnements, prenant, comme on l'a vu, l'humain comme il vient, c'est à dire dans sa définition traditionnelle problématique. Cette définition considère l'être humain comme ayant une spécificité vis à vis du reste du règne animal mais tout cela n'est en définitive qu'un raisonnement hypothétique. Si l'on veut présenter une définition claire et précise de l'humanité, on ne peut l'exclure de la nature, *a fortiori* après les travaux de DARWIN (1859) et de ses descendants.

Les définitions antérieures au cognitivisme avaient le mérite de reconnaître l'animalité inhérente à l'humanité. Ainsi, définir l'humain en le distinguant de la brute doit se faire selon le mode et non pas selon la substance. On en vient alors à se demander en quoi l'intelligence humaine peut être vue comme particulière et, ce faisant, on retrouve le questionnement de BERGSON (1908) :

« En ce qui concerne l'intelligence humaine, on n'a pas assez remarqué que l'invention mécanique a d'abord été sa démarche essentielle, qu'aujourd'hui encore notre vie sociale gravite autour de la fabrication et de l'utilisation d'instruments artificiels, que les inventions qui jalonnent la route du progrès en ont aussi tracé la direction. Nous avons de la peine à nous en apercevoir, parce que les modifications de l'humanité retardent d'ordinaire sur les transformations de son outillage. Nos habitudes individuelles et même sociales survivent assez longtemps aux circonstances pour lesquelles elles étaient faites, de sorte que les effets profonds d'une invention se font remarquer lorsque nous en avons déjà perdu de vue la nouveauté. [...] Dans des milliers d'années, quand le recul du passé n'en laissera plus apercevoir que les grandes lignes, nos guerres et nos révolutions compteront pour peu de chose, à supposer qu'on s'en souvienne encore ; mais de la machine à vapeur, avec les inventions de tout genre qui lui font cortège, on parlera peut-être comme nous parlons du bronze ou de la pierre taillée ; elle servira à définir un âge. Si nous pouvions nous dépouiller de tout orgueil, si, pour définir notre espèce, nous nous en tenions strictement à ce que l'histoire et la préhistoire nous présentent comme la caractéristique constante de l'homme et de l'intelligence, nous ne dirions peut-être pas Homo sapiens, mais Homo faber. En définitive, l'intelligence, envisagée dans ce qui en paraît être la démarche originelle, est la faculté de fabriquer des objets artificiels, en particulier des outils à faire des outils et d'en varier indéfiniment la fabrication. »

BERGSON, *L'Évolution Créatrice*, 1908

On en arrive alors naturellement à la même conclusion favorisant *homo faber* à *homo sapiens* et qui impose d'étudier l'humain dans son rapport à l'outil. Dès lors l'Anthropologie rejoint tout naturellement la Technologie, ce qui nous permet de remettre la cognition à sa juste place. Avec SIMONDON (1958), ce que l'on appelle Technologie n'est pas l'anglicisme issu de *technology* et que l'on devrait traduire par "technique" mais l'étude de cette technique dans son rapport à l'humain et à la culture.

On l'a dit, il ne s'agit nullement ici de refuser l'intelligence à l'humain, ce qui serait une erreur, mais en réalité d'adopter un point de vue pragmatique sur les objets de l'épistémologie²⁷. En d'autres termes, il s'agit moins de se demander ce qu'est l'intelligence humaine que de se demander quelle différence effective son existence²⁸ produit.

Si l'on considère l'intelligence humaine comme la capacité à concevoir et produire des outils, alors son effet pratique le plus important est la modification des relations des êtres humains à leur environnement. Cela se peut faire selon deux manières ; en modifiant cet environnement ou bien en modifiant l'individu²⁹.

Il y a donc un urbanisme et une médecine qui sont inhérents à la condition humaine et ces deux phénomènes s'influencent en se composant pour former ce qu'on appelle la civilisation. Tous deux modifient l'humanité en tant que "ce que c'est que d'être humain" en modifiant son mode de vie à travers des outils et une culture.

Il faut alors bien avoir à l'esprit cette relation tripartite entre anthropologie, technique et culture car c'est de là que son provenues et proviendront toujours les évolutions de l'humanité. À la suite de BERGSON (1908), une conception de l'humanité basée sur la notion d'*homo faber* s'est développée. On trouve chez ARENDT (1958) une actualisation du concept antique de *vita activa* qui va dans ce sens et se décline en trois modes : le travail, l'action et l'œuvre.

Le travail³⁰ est l'activité naturelle liée aux processus biologiques de l'existence humaine. C'est de cette notion originellement grecque d'effort³¹ que la notion moderne de travail a été forgée, notamment sous l'influence de la tradition chrétienne qui la pose comme le corollaire de la faculté de jugement à travers le mythe du péché originel³².

²⁷ C'est à dire une recherche de la caractérisation de leurs effets pratiques

²⁸ En dehors de notre manière de la définir, il existe un consensus sur l'existence même d'une intelligence humaine en raison de son caractère perceptible.

²⁹ De manière directe ou à travers une modification de l'espèce.

³⁰ "labor" dans le texte original.

³¹ ἐργον

³² Dans ce mythe, l'acquisition de la faculté de jugement représente le péché originel lui même alors que la pénibilité de la vie est conçue comme la punition qui en découle.

- L'œuvre³³ correspond aux aspect culturels de l'existence humaine. Ce mode de l'existence humaine n'est pas uniquement symbolique mais est *a contrario* profondément ancré dans la matérialité. L'œuvre représente le processus de réalisation de la fin de l'existence humaine qui est plurielle et protéiforme car elle dépend du contexte culturel dans lequel elle est envisagée. En cela, cette anthropologie rejoint pleinement la notion d'*homo faber* telle que nous l'avons auparavant posée.
- L'action représente les dimensions plurielles de l'existence humaine, c'est à dire ce qui en elle est social et politique.

³³ "work" dans le texte original.

Cette partition ne doit pas faire oublier le fait que chaque événement de l'existence humaine particulière relève en réalité d'une variable mais profonde intrication de ces trois modes. Elle permet toutefois d'accéder à une définition de l'humain proprement satisfaisante en cela qu'elle fait cohabiter le biologique, le culturel et la technique de manière dynamique.

*
**

Ce qui nous intéresse, pour ce qui va suivre, correspond principalement aux relations entre œuvre et travail qui constituent les dimensions respectivement biotiques³⁴ et abiotiques³⁵ de l'activité humaine. Dès lors, ce que l'on cherche à caractériser est une manière de prendre en compte la composante anthropique des systèmes techniques, c'est à dire à chercher comment concevoir l'œuvre tout en prenant en charge le travail de manière à pouvoir influencer sur lui de manière certaine, sûre et prédictible.

³⁴ Par extension du latin *bioticos*, qui permet la vie le biotique est ce qui se rapporte aux être vivants.

³⁵ Construit comme l'inverse de biotique, c'est à dire ce qui ne permet pas la vie, ce qui ne participe pas au vivant.

En cela, cette thèse n'est donc pas un essai d'épistémologie ou de philosophie des sciences mais relève véritablement de l'ergonomie, entendue non de la manière ingénieriale et appliquée que l'on rencontre généralement mais envisagée dans une optique plus générale, posant les bases du dépassement qualitatif nécessaire au développement du progrès technique et en particulier à celui des systèmes humain-machine. La dimension proprement actionnelle de l'être humain³⁶ trouve son aboutissement dans le politique considéré comme l'ensemble des structures de niveau hiérarchique supérieur à celui du groupe. Ce domaine comprendra alors la philosophie politique, la sociologie générale ou bien encore l'économie. Il est bien évident que notre approche suppose que toute

³⁶ Au sens d'un *Menschheit* c'est à dire le "ce que c'est que d'être humain".

³⁷ e.g. Une révolution technique comme l'automobile a par exemple beaucoup contribué au phénomène de "sédentarité" et provoqué des modifications du tissu urbain.

modification d'envergure de l'un des trois modes de l'activité humaine va considérablement modifier les autres³⁷. Toutefois, étudier cet aspect du phénomène technique nécessiterait un traitement dédié pour pouvoir être véritablement pertinent et s'éloignerait beaucoup de notre sujet. Aussi avons nous choisi de ne considérer l'œuvre que dans ses aspects interindividuels.

³⁸ On préfère l'anglicisme à sa traduction française par "conception" qui peut s'avérer problématique.

Pour traiter ce problème de la place de l'humain dans la technique, il nous faudra alors considérer deux types particuliers d'objets ; le vivant et la technique. D'une part, il convient de rappeler ici que le *design*³⁸, entendu comme extension de l'ingénierie, se base sur des modèles pour produire de la connaissance. D'autre part, l'étude du vivant trouve sa justification épistémique dans la mise en évidence de preuves factuelles³⁹. Ce que l'on cherche donc à construire est une manière de réunir ces deux méthodes dans un cadre commun permettant de répondre au second paradoxe du design des complexes anthropotechniques à savoir que la conception sûre des systèmes humain-machine doit à la fois dériver de connaissances analytiques a priori et de connaissances synthétiques a posteriori c'est à dire d'une ingénierie qui se base sur les modèles et d'une médecine qui se base sur les preuves empiriques.

³⁹ *Evidence* en anglais.

*
**

⁴⁰ L'un ne va de toute façon pas sans l'autre.

PARTANT de la double idée qu'il s'agit à la fois de replacer les facteurs humains dans les sciences naturelles et de construire un ensemble théorique permettant le design sûr des complexes anthropotechniques⁴⁰, le cadre général de notre travail se structurera autour de la notion d'intégration. Le terme même d'intégration nous provient de deux sources, (TERENTIUS AFER, p. d.) et (LUCRETIUS CARUS, p. d.), pour qui il s'agit respectivement de rendre à une chose sa condition d'origine ou pour plusieurs choses de concourir à la création d'une plus importante⁴¹, ce qui correspond parfaitement à notre projet.

⁴¹ L'exemple ici est celui de fleuves se jetant dans la mer.

⁴² Sur le problème de l'utilisation francophone des notions dérivées de l'*experience* anglo-américaine, on renverra à l'article de GIREL (2014).

Ce que l'on cherche donc à montrer, c'est que l'être humain est indissociable de son environnement, que celui ci soit naturel ou artificiel, dans la mesure où sa condition de sujet *expérientiateur*⁴² est directement fonction de la relation dans le temps et l'espace entre le corps anatomico-physiologique et l'environnement. Il ne faut alors plus comprendre la construction du réel comme un ensemble de boîtes

contenant des boîtes mais comme un *continuum* issu de la réticulation de différents phénomènes au sein de niveaux spatio-fonctionnels spécifiques. Selon cette conception, il devient impensable de considérer l'interaction anthropo-technique comme un phénomène unidimensionnel, puisqu'elle met toujours en œuvre un substrat physico-chimique, biologique et culturel.

Il ne s'agit donc pas d'incorporer une pensée indépendante dans une machine charnelle mais, bel et bien, de considérer le cognitif comme une fonction du corps en acte⁴³ subordonnée à la conscience, fonction corporelle de plus haut niveau et issue de l'interaction entre l'ensemble des phénomènes corporels et l'ensemble des phénomènes hyper-individuels⁴⁴. Dès lors, augmenter/réparer/comprendre l'humain revient à analyser et impacter de façon plus ou moins profonde un ensemble de couplages à un niveau déterminé de hiérarchie spatio-fonctionnelle afin d'influencer les autres niveaux.

La conception des systèmes humain-machine se base actuellement en grande partie sur le paradigme cognitiviste qui a absorbé une part non négligeable de la cybernétique à travers certains courants connexionistes et demeure donc selon le mot de FODOR (1975) : "the only game in town". Dès sa fondation, cette conception de la "nature humaine" a suscité de nombreuses critiques, liées à son caractère dualiste⁴⁵, conduisant à l'adoption de solutions *ad hoc* afin de prendre en charge l'intégralité du sujet humain⁴⁶.

La dimension corporelle est en effet devenue un facteur prépondérant dans le design des dispositifs techniques et dans l'appréhension du facteur humain en général. Cela s'explique par un changement dans la vision de l'activité qui s'est opérée progressivement depuis quelques décennies. L'activité technique est ainsi passée du statut de savoir opérationnel à celui d'un ensemble de comportements contextualisés, donnant ainsi naissance au concept d'"humain dans la boucle"⁴⁷. Si cette évolution est à saluer à titre historique, elle reste à dépasser d'un point de vue épistémologique, dans la mesure où elle ne constitue qu'une prise en compte du corporel au travers de sa relation avec le cognitif, menant ainsi à une impasse dans le design des systèmes à dimension critique, tels que les systèmes humain-machine de défense, de médecine ou de l'aérospatiale, en raison d'une perpétuation de la hiérarchie dualiste.

⁴³ En cela qu'il n'y pas de corps "hors acte" sauf éventuellement dans le cas de la mort.

⁴⁴ C'est à dire des phénomènes ayant lieu à un niveau d'échelle supérieur à celui de l'individu.

⁴⁵ En raison de la métaphore hardware/software prévalente chez les computationnalistes.

⁴⁶ À travers les théories de la cognition étendue, distribuée, incarnée, etc...

⁴⁷ Abrégé en HITL.

Dans la perspective d'une analyse diachronique, il s'agira alors d'explorer trois corpus. Le premier sera celui d'une psychologie post-cognitiviste fondée en partie sur la neurophysiologie d'EDELMAN (1992), la philosophie de l'esprit de DREYFUS (2006) ainsi que sur la psychologie écologique issue de GIBSON (1979). Le deuxième sera la technologie telle que la définit SIMONDON (1958) et la pensée de la technique ainsi que de l'objet tel que le pose ARENDT (1958) comme une dimension nécessaire de la condition humaine. Enfin le troisième qui se fonde sur la redéfinition de la notion d'interaction par la physiologie intégrative de CHAUVET (1995) permet de construire de nouvelles manières de concevoir et décrire la causalité de façon "non-aristotélicienne" entre deux systèmes considérés selon la théorie de L. v. BERTALANFFY (1968). Cela fait, nous disposerons alors d'une métaphysique de base, que l'on appellera advenialisme, permettant de construire des définitions des choses et de leurs relations dans une épistémologie pragmatique dont on dégagera les grands principes.

Le projet n'est pas ici de décrire pour la seule satisfaction de la contemplation philosophique. Notre objectif est de fournir des moyens de diriger la conception de l'anthropotechnique à travers l'ergonomie théorique et il faut donc aller au delà de la question de l'essence de l'objet en la mettant au service de la description des systèmes à travers une analyse de l'ingénierie et des problèmes de modélisation en se basant notamment sur les travaux de FASS (2002, 2012) autour de la notion d'intégration humain(s)-machines(s) qui fait le lien entre l'épistémologie pragmatique et l'ingénierie systèmes. De façon complémentaire, il est nécessaire de rendre actionnable cette notion à travers l'établissement d'une critériologie. Cet ensemble de critères permettant la désignation des complexes anthropotechniques à travers une ontologie de conception se basera sur les travaux de SCAPIN et BASTIEN (1997), à partir desquels nous réaliserons une analyse critique à l'aide des trois doctrines que nous soutenons, post-cognitivism, advenialisme et intégrativisme pour en fournir une révision.

Notre thèse est donc qu'il est nécessaire d'affirmer la nécessité de décrire et comprendre l'humain à travers un paradigme postcognitivist, c'est à dire en repensant la relation entre opérateur et système comme un ensemble de couplages simultanément physiques, biologiques et symboliques, là où le computationalisme propose un déroulement parallèle de

fonctions indépendantes occasionnellement synchronisées. Il faut alors parvenir à construire une définition holiste de ces différents couplages fonctionnels entre vivant et technique, tenant compte des spécificités de ces deux modes d'être au monde ainsi que des travaux antérieurs en ergonomie, afin de constituer les principes d'une ontologie de conception, considérée comme une extension de cette dernière, appliquée à sa relation au design.

Première partie

Épistémologie de l'interaction

Épistémologie de l'interaction

PENSER les systèmes humain-machine est un exercice délicat. En effet, cela impose de comprendre, dans le concret, l'état de la technique disponible ainsi que ses manières d'interagir avec l'humain. De plus, parler ainsi de système humain-machine peut laisser croire que le sujet d'intérêt ici est la juxtaposition de deux natures différentes, chacune hermétiquement close à l'autre. S'il en était ainsi, notre recherche serait celle des conditions d'une adjonction harmonieuse dans des circonstances déterminées. Seulement, il n'en va pas ainsi car la prévalence de l'usage des objets techniques ne fait que croître tandis que les moyens d'engendrer de l'interaction sont de plus en plus nombreux, diversifiés et complexes.

Penser la technique dans ces conditions nouvelles impose donc de problématiser et de conceptualiser ce domaine à nouveaux frais. D'aucun pourrait alors arguer que cette juxtaposition n'est qu'une vue de l'esprit et n'a jamais existé et que l'usage de la technique a sans cesse modifié l'humain porteur d'outil. Cela ne changerait alors rien à la nécessité de conceptualisation si l'on veut construire non pas une connaissance historique de la technique mais une véritable technologie systématique permettant de guider la conception. Il nous faut alors penser au delà de la juxtaposition en pensant l'intégration et ses modalités et par là décrire ce que nous appellerons l'anthropotechnique, classe de ces systèmes hybrides qui mettent en œuvre un ou plusieurs sujets humains ainsi qu'un ou plusieurs systèmes techniques, à travers les concepts existant dans l'ingénierie et la biologie pour en tirer de nouveaux, propices à l'ergonomie.

Mais avant de prétendre à cette synthèse anthropotechnique, il est nécessaire d'explicitier la signification des concepts propres au domaine qui sont de deux types ; structuraux et objectifs¹. Ces concepts objectifs,

¹ La forte connotation doctrinales du terme *objectal* rend ici l'utilisation d'un néologisme préférable.

décrits dans le chapitre suivant, sont au nombre de trois et désignent les objets décrits par l'ergonomie théorique à savoir l'humain, la machine et l'interaction. Par opposition, les concepts structuraux sont les notions qui permettent d'analyser et de structurer toute description du monde ; ils comprennent entre autres la notion de concept, et celle de fonction, qui sont plus générales que le domaine de l'anthropotechnique.

CHAPITRE I

Conception des Interfaces Homme-Machine

LA notion d'Intégration Humain Systèmes¹ est défini par la NASA (2016) comme « an umbrella term for several areas of "human factors" research that include human performance, technology design, and human-computer interaction. The study of Human Systems Integration at NASA Ames Research Center focuses on the need for safe, efficient and cost-effective operations, maintenance and training, both in space, in flight and on the ground. »

¹ Abrégé en HSI.

Cette approche de la technique, comme système d'objets inclus dans des réseaux d'interactions eux même en interaction, n'a pu se faire que très tard dans l'histoire, dans la mesure où elle nécessite d'avoir le concept de *système complexe*, qui n'apparaît qu'au milieu du XX^{ème} siècle avec les travaux de L. v. BERTALANFFY (1968)² et de WIENER (1948).

² Pour une description complète de la théorie systémique de Bertalanffy on se référera à L. BERTALANFFY (1968).

De façon similaire à ce qui s'est produit avec le concept moderne d'interaction, la disponibilité de certains concepts clés n'entraîne pas immédiatement l'apparition d'un nouveau concept. Comme le remarque bien KUHN (1962), les changements de paradigme et l'apparition de nouveaux paradigmes sont conditionnés par l'existence d'une crise, c'est à dire un problème conceptuellement insolvable en l'état actuel de la science. L'une des clés pour comprendre l'apparition de l'HSI est la notion d'accident normal introduite par PERROW (1984).

L'exemple primitif d'accident normal est, d'après PERROW, l'accident de la centrale de Three Mile Island en 1979. Les détails de l'accident sont disponibles chez ROGOVIN (1979). Le point de départ de l'accident est une panne des pompes du système de refroidissement secondaire menant à l'ouverture des soupapes de sécurité du système de refroidissement qui ne s'est pas refermée après que la pression fut retombée. Ceci a entraîné une mise en action du système de sécurité, dont la fonction est d'apporter de l'eau dans le circuit, ce qui a conduit à une production de vapeur avec la surchauffe et à des phénomènes hydrodynamiques perturbant les capteurs de pression qui induisirent en erreur l'opérateur, qui arrêta le système de sécurité. Conjointement, une vanne du système de refroidissement de secours était restée fermée depuis quelques jours, ce qui a empêché sa mise en action. Tout cela a finalement conduit à la fusion d'une partie du combustible de la centrale et obligé à la mise en place de protocoles extraordinaires, afin de limiter les conséquences de l'accident.

Pourtant, il est intéressant de remarquer que, pris isolément, la panne des pompes et la fermeture non prévue de la valve du système de secours sont des dysfonctionnement relativement mineurs ou au moins réparables. C'est ici que la notion de système de couplage et celle de systèmes complexes se rejoignent afin de répondre à la question "comment des incidents aussi mineurs peuvent ils entraîner un accident nucléaire de cette ampleur?". Cela se produit parce que les deux dysfonctionnements sont apparus de manière conjointe, tout en n'étant aucunement liés l'un à l'autre.

S'ensuit pour PERROW (1984) la prise de conscience que dans un système complexe, l'existence d'erreurs de ce genre est inévitable et, en raison du haut niveau de couplage dans le système, l'interaction imprévisible entre ces erreurs produit une réaction en chaîne d'évènements conduisant à la catastrophe. On retrouve ainsi la notion de réseau technique, que développe SIMONDON (1958), au sein duquel plusieurs assemblages ont nécessairement des évolutions qui vont interagir de façon ici délétère, en raison d'une intégration incomplète qui ne fait pas de la centrale un individu technique. Peu importe ici que cette intégration soit susceptible ou non d'être mise en œuvre, ce statut d'assemblage complexe empêche de comprendre analytiquement le comportement du système dans son intégralité, sans faire usage d'une modélisation très détaillée de scénarii, difficiles à anticiper par le concepteur.

Ce que montre l'accident de la mission Apollo 13³ est que, bien que l'accident de vol remplisse les caractéristiques de la théorie de PERROW (1984), l'équipage et le contrôle de mission réussirent à utiliser le module lunaire et ses moteurs pour pallier à l'inutilisabilité du module de service. Ceci a nécessité d'improviser des solutions techniques en matière de gestion de l'énergie, de système de contrôle de l'environnement⁴ et de navigation ce qui permit le retour de l'équipage sur Terre. On comprend alors bien, avec cet exemple, en quoi le facteur humain dans un système socio-technique, s'il est source potentielle d'erreur, est un composant très versatile dans la recherche et l'implémentation de solutions de sortie de crise.

L'autre point essentiel pour l'HSI, que montrent ces deux exemples est la nécessité d'une redéfinition de ce qu'est un système socio-technique. En effet, la manière la plus simple d'envisager un système technique est de le projeter dans son utilisation afin d'en tirer les spécifications nécessaires à sa construction. Après que les accidents systémiques des années 1970 aient été analysés, il est apparu que la maintenance ainsi que les phénomènes de dépendance à d'autres systèmes⁵ sont partie intégrante du système et qu'ils doivent être intégrés comme tels dès la phase de design.

Dès lors, il est nécessaire d'affronter la difficile réalité de la technique qui se résume par la formule : "les objets techniques n'existent pas". En effet, la mise en isolation d'un objet technique le rend inerte⁶ sitôt qu'il se trouve exclu d'une situation d'usage quelconque⁷. Si l'on considère alors, avec SIMONDON (1958), qu'un objet technique s'individue dans certaines circonstances, un système technique complexe est généralement constitué de différents objets techniques dont les relations sont organisées hiérarchiquement. Il y a donc, à certains niveaux d'échelle, l'existence d'un milieu intérieur⁸ qui va être l'environnement de fonctionnement de l'objet technique considéré.

³ Voir *MSC Apollo 13 investigation team. Panel 1 - Spacecraft incident investigation. Volume 1 - Anomaly investigation Final report* (1970) pour une analyse détaillée.

⁴ Responsable du chauffage du module et de la filtration de CO₂.

⁵ Le contrôle de mission dans le cas d'Apollo 13.

⁶ Et donc abstrait par la force des choses.

⁷ Dans certaines conditions, l'exposition peut être une situation d'usage mais ceci représente un cas très particulier.

⁸ Pour reprendre la notion développée par BERNARD (1879).

1.1 INGÉNIERIE DES SYSTÈMES TECHNIQUES

Le tableau 1.1⁹ introduit l'existence de différents niveaux de complexité, issus de l'organisation des systèmes sociotechniques. Un élément de classe donnée fait partie d'un élément de classe supérieure et ainsi de suite, ce qui explique comment les problèmes relatifs aux interactions se diversifient

⁹ Cf. 48.

avec l'échelle du système et en quoi, par exemple, il est plus difficile de concevoir un aéronef qu'un écran. Cela ne tient pas uniquement aux dimension techniques du système mais à sa classe de complexité, selon laquelle il sera plus ou moins interchangeable, aisé à maintenir en fonctionnement....

TAB. 1.1 : Complexité dans les systèmes sociotechniques, d'après BOOHER (2003) : Chaque ligne correspond à un système sociotechnique qui est un sous-système du précédent.

Système sociotechnique	Domaine d'activité		
	Santé publique	Transport	Militaire
A. Organisations très hautement complexes	Ministère de la Santé	NASA	Ministère de la Défense
B. Organisations très complexes	Hôpitaux	National Airspace System	
C. Systèmes de systèmes	Service d'Urgences	Compagnie Aérienne	Porte-avions
D. Systèmes techniques majeurs	Machine d'IRM	Tour de contrôle aérien	Avion
E. Systèmes critiques	Moniteur	Radar	Cockpit
F. Outils et pièces	Cathéter	Piste d'atterrissage	Radio

L'enseignement de BOOHER (2003) est qu'il n'existe aucun système qui ne soit utilisé indépendamment d'autres systèmes, dans la mesure où le rôle de la complexité sociotechnique est d'apporter une coordination permettant d'améliorer et de sécuriser l'usage d'un système. Cette coordination se manifeste de diverses façons ; cela peut se traduire par l'organisation de la maintenance des systèmes, l'adjonction d'un support opérationnel humain, l'entraînement des utilisateurs.... Intégrer un système technique dans un ensemble sociotechnique ne revient toutefois pas nécessairement à éliminer l'autonomie d'action de l'utilisateur, mais permet de trouver des solutions plus nombreuses et variées lorsque celui-ci rencontre un accident. Cette remise en question et cette perspective élargie sur la nature des systèmes sociotechniques mène à trois principes définis par HOBBS, ADELSTEIN, O'HARA et NULL (2008) concernant la qualité d'un produit en termes d'HSI :

- Compatibilité avec les capacités et caractéristiques humaines.
- Tolérance à l'erreur humaine.
- Capacité à tirer parti de la versatilité humaine.

A cet égard, si l'on compare l'exemple de Three Miles Island et celui d'Apollo 13, il est possible de constater en quoi le second constitue un système technique humainement plus intégré que le premier, bien que le scénario qui permet de juger de cette intégration n'ait pas été élaboré par les concepteurs.

Ce que les auteurs appellent ici produit rejoint ce que nous appelons complexe anthropotechnique. Cela inclut le matériel, le logiciel, la documentation, l'entraînement et les procédures de mise en œuvre. Ce point de vue rejoint celui de SIMONDON (1958), qui plaide pour une ontogénèse des individus techniques et nécessite alors de considérer les objets techniques que l'on étudie comme une unité d'être, évolutive, de sa conceptualisation à son usage, en passant par sa conception et par les interactions qu'elle engendre avec son milieu associé, comme la maintenance, l'usage ou l'entraînement.

*
**

Ce qui lie l'humain et la machine dans l'usage d'un objet technique, c'est de l'information, entendue non pas comme encodage et décodage d'une séquence de symboles mais comme événement significatif¹⁰. C'est en tant qu'événement significatif que l'échange d'information peut être considéré, en seconde analyse, comme symbolique. Dès lors, il faut que l'on considère la communication humain-machine dans sa globalité comme un échange d'information propice à modifier l'évolution de l'une ou l'autre des parties du système. Cela pose un problème de psychologie important car selon le paradigme dans lequel l'on se place, les définitions de l'information et de la cognition vont fortement varier ce qui aboutit à concevoir *in fine* des systèmes différents.

¹⁰ Comme le dit SIMONDON (1958); "l'information n'est pas de la forme, ni un ensemble de formes, elle est la variabilité des formes, l'apport d'une variation par rapport à une forme".

En cela la norme ISO 9241-210 : 2010. *Ergonomics of human system interaction-Part 210 : Human-centred design for interactive systems* (2009) contourne cette problématique informationnelle dans la mesure où elle se concentre sur les tâches effectuées par un opérateur humain et les caractéristiques directement observables associées à ces tâches. À ce titre, elle est relativement insuffisante à elle seule pour guider la conception de systèmes anthropotechniques et nécessite d'être complétée par d'autres méthodologies.

Ces méthodologies ont été formalisées au cours du XX^{ème} siècle notamment dans le domaine du génie logiciel, discipline dont l'objet principal a été, pour reprendre les termes de HAMILTON et ZELDIN (1976), de : " [...] concevoir, développer et gérer les logiciels avec une méthodologie formalisée pouvant être utilisée par les informaticiens

comme par les ingénieurs afin de décrire et communiquer les interfaces entre systèmes. ”¹¹

¹¹ Notre traduction.

ROYCE (1970) postulait déjà que la conception logicielle prend nécessairement la forme d'un processus binaire Analyse - Production. Dans les cas simples, ce postulat est évidemment inattaquable ; il permet, en effet, de répondre à la question ”que doit faire le logiciel ?” par un algorithme implémenté dans une machine. De l'aveu même de ROYCE cette démarche que l'on va qualifier de naïve est extrêmement limitée et nécessite des actions supplémentaires afin de délivrer un produit satisfaisant.

Ainsi, si la conception naïve fonctionne à une certaine échelle fonctionnelle, elle devient inopérante pour des produits complexes assez rapidement. Dès lors, les procédures additionnelles mentionnées plus tôt mais non formalisées deviennent des étapes de la démarche de conception dite *en cascade*¹². Dans l'idéal, une rétroaction de chaque étape sur la précédente existe mais, en réalité, ce mode de conception repose avant tout sur la mise à l'épreuve dont le rôle fondamental est d'exhiber, soit un problème de conception, le produit remplit mal sa tâche, soit un problème d'exigences, le produit ne remplit pas la tâche qu'il devrait effectuer.

¹² Voir figure 1.1 page 51.

Alors, s'il est tentant de voir une récursivité, ici, il faut prendre garde, dans la mesure où le retour en arrière qui se produit est en réalité une mise en échec du travail préalablement effectué et que ceci n'est pas une composante du processus mais une conséquence négative de la conception.

Pour pallier à ce problème, ROOK (1986)¹³ introduit une méthode de conception graduelle basée sur la dualité Processus - Produit qui reproduit à chaque étape le couple Analyse - Production de ROYCE (1970). Ainsi, en établissant des correspondances entre chaque étape de la production et chaque étape de la conception, il devient possible de gagner en réactivité, puisqu'il n'est plus nécessaire de reprendre la conception *de novo* en cas d'échec aux tests.

¹³ Voir figure 1.2

BOEHM et HANSEN (2000) considèrent que ces méthodes ne sont que des cas particuliers du modèle en spirale de BOEHM (1988). Il est notable de constater le lien de parenté entre ce cycle de développement en spirale et celui décrit dans la figure 1 page 26, relative à la norme ISO 9241-210 : 2010. Ergonomics of human system interaction-Part 210 : Human-centred design for interactive systems. On peut en effet concevoir l'approche de

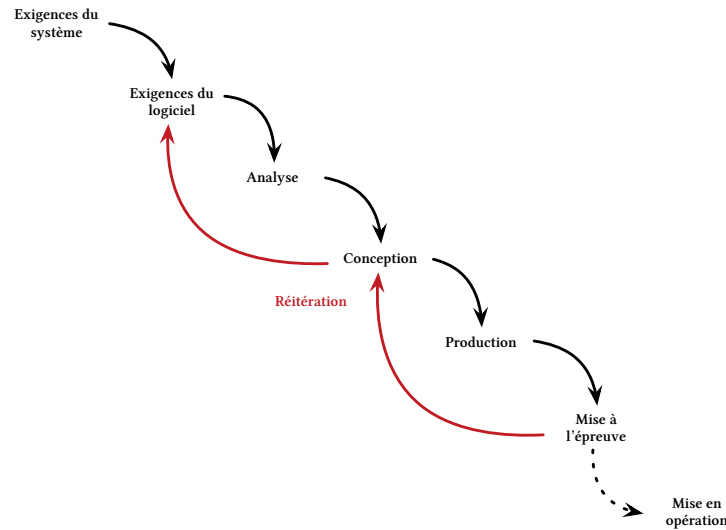


FIG. 1.1 : Le cycle de conception logicielle en *cascade*, d'après ROYCE (1970) : En commençant par l'expression des exigences du système, chaque étape est conditionnée par l'achèvement de la précédente. Les flèches rouges montrent le retour d'expérience du produit final testé, qui fait office de récursivité.

Conception Centrée Utilisateur ou UCD¹⁴ comme un cas très particulier de conception en spirale unidimensionnelle, en cela que le design d'IHM tend à se concentrer sur les éléments interactifs qui composent l'interface du système, en le considérant généralement par et pour eux même et reléguant d'autres paramètres au rang de contraintes sur les spécifications du système.

¹⁴ User Centered Design

Ainsi, BOEHM (1988) permet de poser la question du rôle de la modularité dans le processus de conception. Cette approche de la modularité renvoie à une division technique des tâches dans le système et le concepteur IHM a comme prérogative la partie bien délimitée du système qui est liée aux entrées et sorties d'information lors de la mise en œuvre. Il faut toutefois distinguer une subtilité dans l'usage de la notion d'IHM qui peut contenir indifféremment la notion d'interface ou celle d'interaction.

La notion de conception d'Interface humain(s)-machine(s) est la plus traditionnelle, puisqu'elle correspond aux machines primitives dont on reparlera en 3.2 (page 105). Elle consiste historiquement à concevoir un intermédiaire technique entre l'opérateur et la machine mise en œuvre. La notion de design d'Interactions humain-machine est à rapporter à celle

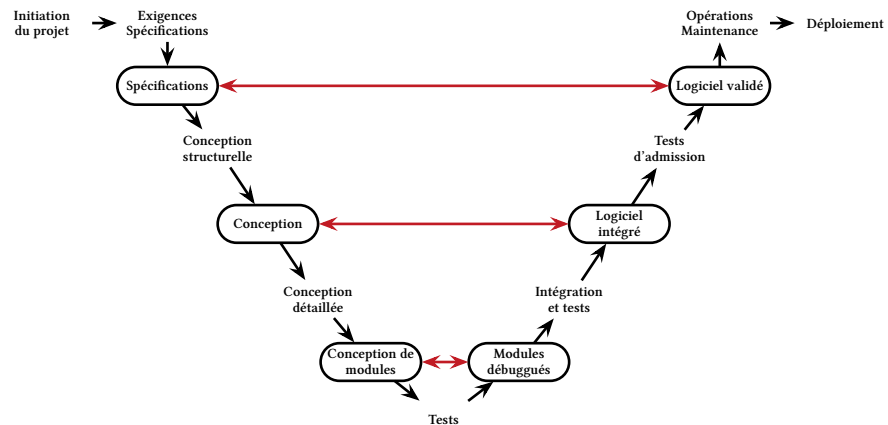


FIG. 1.2 : Le cycle de conception en V, d'après Rook (1986) : À partir des spécifications, la conception se fait de façon modulaire, ce qui permet d'obtenir un retour d'expérience partiel (en rouge), non plus à partir du produit final mais du test de ses parties.

d'expérience utilisateur, notamment en ce qui concerne l'utilisabilité telle que la posent BARCENILLA et BASTIEN (2009). Concevoir les interactions *a fortiori* dans des systèmes sociotechniques, eux même complexes ou pris dans un réseau de complexité, nécessite de prendre en charge, dès la conception, une grande variété de modalités qui ne sont pas seulement physiques ou cognitives mais peuvent être de l'ordre de l'organisation du temps de travail ou d'autres facteurs *a priori* exogènes.

Concevoir un produit ne revient plus seulement à assembler divers éléments techniques au sein d'un ensemble interne cohérent mais doit nécessiter la prise en charge de cette *interaction* humain-machine qui, de fait, est un ensemble de phénomènes dont la complexité sera variable selon le type de système considéré. MAHLKE (2008) a tenté de décrire de façon schématique ce qui caractérise l'expérience utilisateur décrite dans la figure 1.4 page 54. Si cette approche a le mérite de souligner le grand nombre de facteurs conditionnant l'utilisation d'un système, elle pose néanmoins un problème de taille lié à la façon dont elle structure le phénomène.

En effet, l'interaction humain-système est nécessairement dépendante des propriétés de l'opérateur, du système et du contexte. Poser l'utilisation comme un phénomène déterminé par une agentivité modulaire, c'est à dire divisée entre processus hédoniques et pragmatiques selon la terminologie de HASSENZAHN (p. d.), efface la complexité qui lui est

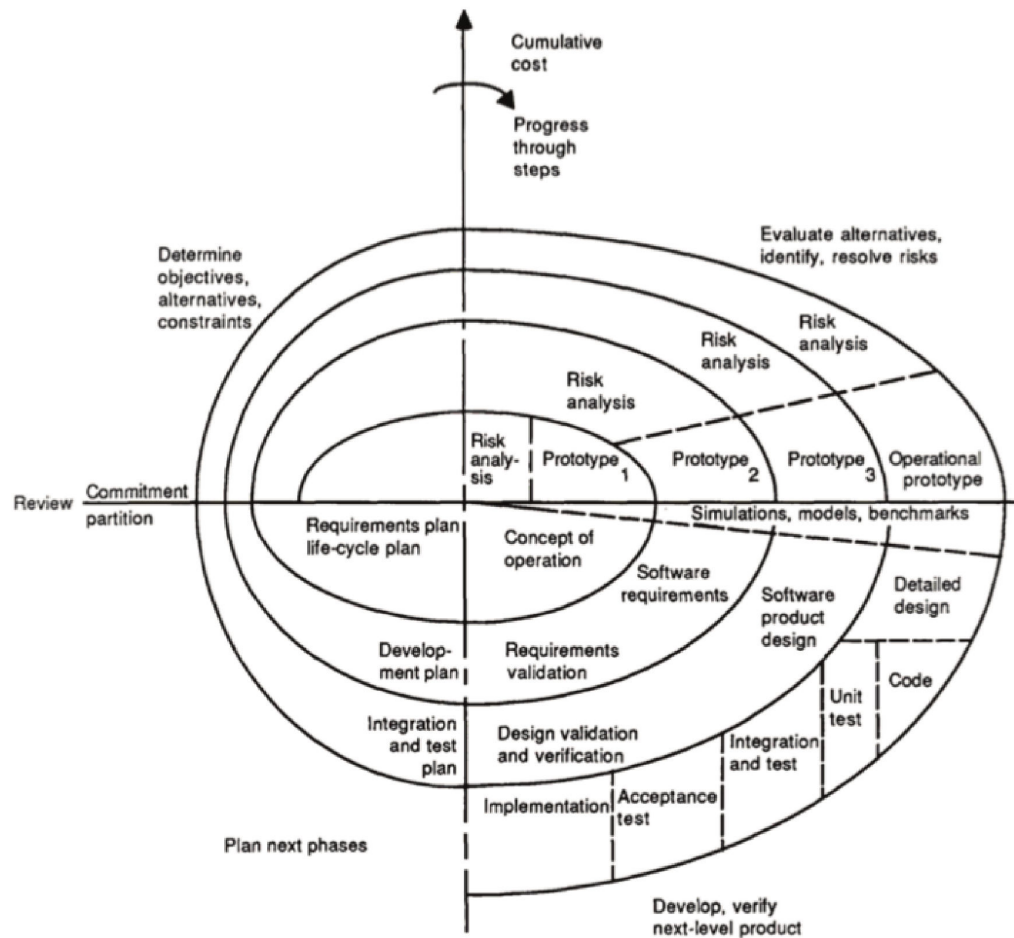


FIG. 1.3 : Le cycle de conception en spirale, d'après BOEHM (1988) : En partant des exigences (au centre), on construit à chaque itération un prototype permettant de valider certaines hypothèses de conception. À chaque itération ce prototype se complexifie pour parvenir au produit final.

inhérente. De plus, comme on l'a déjà vu, il est essentiel de prendre en compte dans l'analyse l'existence de différentes échelles de complexité qui ne sont pas analysées ici ou qui doivent être considérées comme des éléments de contexte intervenant de façon indirecte sur l'expérience utilisateur, comme par exemple l'organisation des services hospitaliers. Par conséquent, cette approche descriptive de l'expérience utilisateur ne permet pas de rendre compte de la complexité dynamique et, au delà, trouve très vite ses limites dans les systèmes dont la dimension hédonique est réduite, comme c'est le cas dans beaucoup de systèmes à dimension critique.

Le principal problème que pose, selon nous, l'approche de MAHLKE (2008) est de dissocier interaction et expérience. Poser les comportements comme une conséquence de l'expérience utilisateur induit une

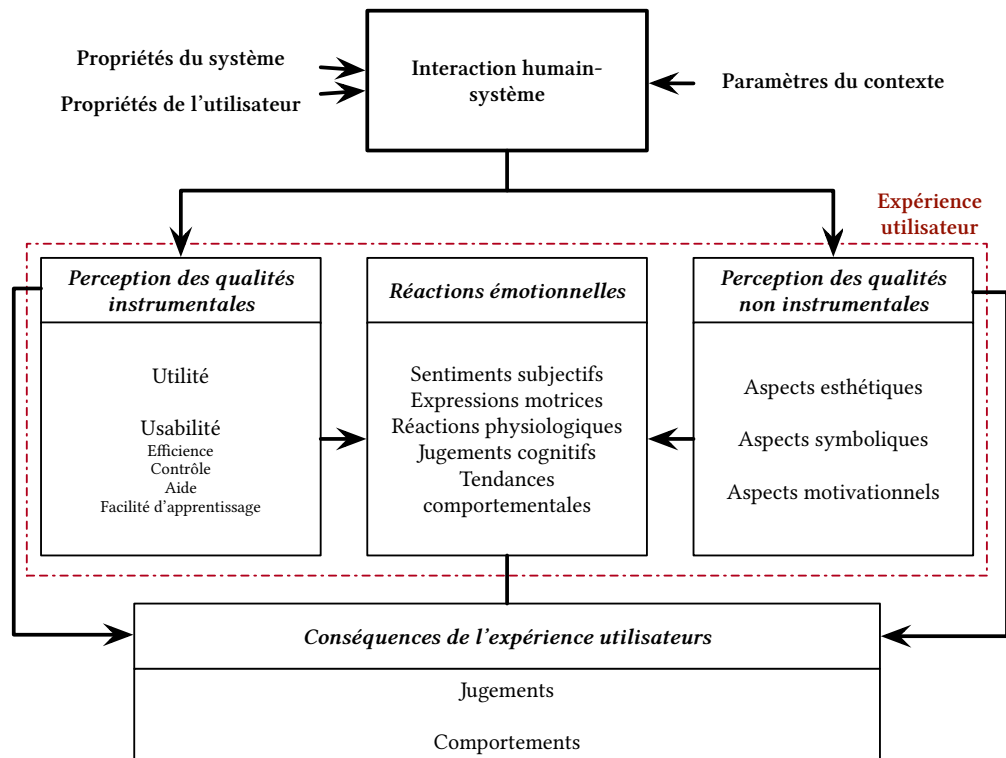


FIG. 1.4 : L'expérience utilisateur, d'après MAHLKE (2008) : L'expérience utilisateur découle de l'interaction entre utilisateur et système et se divise en trois modules qui ont une influence croisée et modulent le comportement et les jugements de l'utilisateur.

séquentialité problématique puisque l'expérience utilisateur est directement contemporaine de l'usage et n'en est pas le produit. L'expérience utilisateur est donc une intégration par l'opérateur de l'ensemble des composantes de l'interaction considérée comme un phénomène objectif. Sa compréhension nous permet alors de comprendre les dimensions modales de cette interaction, c'est à dire de savoir, en plus de ce que fait le système humain(s)-machines(s), comment il le fait, ce qui est une problématique extrêmement importante.

De plus, si cette approche rend bien compte du phénomène d'utilisation dans un contexte d'informatique commerciale grand public, elle délaisse une part non négligeable des composantes sociotechniques qui caractérisent l'usage d'un outil par un public expert comme l'entraînement ou la culture utilisateur qui sont des données essentielles dans les contextes médicaux ou aéronautiques.

Pour cela, il faut prendre en charge la complexité de l'opérateur et le considérer comme un système intégré et non pas une juxtaposition de

modules. Ce faisant, il devient possible d'envisager comment différents phénomènes, par exemple émotionnels et physiques, interagissent afin de moduler un comportement. Cela remet au centre des choses une donnée primordiale de l'opérativité¹⁵ qui est la prise d'information dans l'environnement médiat et immédiat. Il devient donc nécessaire de réviser la manière dont l'on conçoit l'interaction et les éléments qui y participent.

¹⁵ Fait d'être un opérateur.

Cette emprise de la signification, fut-elle simple dans le cas des affordances ou bien complexe dans le cas de l'usage d'éléments symboliques a de grandes implications sur la nature même de la conception. Ainsi, concevoir n'est pas spécifier une entité dotée de capacités propres à communiquer du sens transcendant à l'utilisateur. C'est construire les circonstances dans lesquelles le processus de sémiose peut être, non pas contrôlé, mais canalisé vers des résultats stéréotypiques, c'est à dire des comportements prédictibles dans des circonstances déterminées.

1.2 LA CONCEPTION INTÉGRATIVE DES SYSTÈMES HUMAIN-MACHINE

LA conception, en général, consiste à trouver dans l'objet ou l'ensemble d'objets des moyens d'interagir avec l'utilisateur, soit de manière contrainte, soit de manière créative. Il existe un lien fort entre signification et affordance lié à la notion d'habitude qui est à la source de l'entraînement des utilisateurs. Le processus d'établissement de la signification peut être perçu comme une syntonisation¹⁶ entre les représentations individuelles et les groupes des signes disponibles en vue d'un résultat d'ordre pratique. Il s'agit de la communication interindividuelle, que celle-ci soit directe ou asynchrone. De plus, ce processus n'est pas purement symbolique car il se rapporte à la perception, qui est également un comportement dynamique qui aboutit également dans l'action.

¹⁶ Par analogie avec l'électronique où la syntonisation est l'accordage de plusieurs circuits sur la même fréquence.

Ainsi, une théorie pragmatique de la signification élargit le champ d'une théorie écologique de la perception en prenant en compte l'existence d'une conscience réursive au sens de JAMES (1890), c'est à dire d'une pensée capable d'exister sans qu'une entité tierce ne soit nécessaire. En d'autres termes, penser à un objet en termes jamesiens n'est pas une relation triadique { sujet - pensée - objet } qui se réaliserait séquentiellement mais la relation dynamique entre une expérience continue et un objet. On retrouve ici une similarité et une proximité avec le fonctionnement

des champs perceptuels de GIBSON (1966) dans lesquels la perception est une discrimination au sein d'un champ sensoriel toujours actif ce qui correspond bien à la définition de SIMONDON (1958) de l'information comme "apport d'une variation par rapport à une forme".

Si le signe est modificateur d'habitude autant que celle-ci influe sur la signification que le sujet attribue, son importance dans l'émergence de certaines affordances devient *de facto* primordiale. Cela pose la question première de ce que l'on conçoit ; un objet ou un ensemble d'interactions ? Cette question traditionnelle se dissout d'elle même si l'on considère l'être au monde humain d'un point de vue écologique puisque rien n'existe qui ne soit une interaction. Construire un dispositif interactif n'est donc en définitive que la mise en place d'interactions sémiotiques efficaces dans un système autrement constitué d'interactions physiques et informationnelles. Il est donc à cet égard contre productif de distinguer cette classe de systèmes des "objets traditionnels" puisque l'on a vu que l'interaction sémiotique, en tant que coproduit de la perception humaine, est omniprésente. Dès lors ce qui caractérise un système dit interactif n'est pas sa nature mais la priorité donnée aux interactions sémiotiques dans sa mise en œuvre souhaitée.

Comme on l'a vu à travers l'exemple de la mission Apollo XIII, il est primordial que la conception d'un système à dimensions critiques préserve la sérendipité de l'opérateur humain. Cette sérendipité correspond à ce que SIMONDON (1965) dit de l'invention en la définissant comme l'"apparition de la compatibilité extrinsèque entre le milieu et l'organisme et de la compatibilité intrinsèque entre les sous-ensembles de l'action".

Ainsi il est aisé de comprendre, d'un point vue historique, comment s'est produite l'éclipse du matérialisme, à la fois par manque de matière mais aussi en raison de la commodité de l'hylémorphisme et de son adoption plusieurs fois millénaire. Concevoir, avant le XIXème siècle, c'est donc nécessairement trouver la réunion d'une forme idéale et d'une matière adaptée à cette forme. Dans ce contexte, concevoir c'est donc primitivement construire une forme analysable en fonction des besoins soulevés. Il faut ici considérer la forme comme archétype, et non dans son sens géométrique ce qui implique que concevoir dans la plus pure tradition hylémorphique nécessite de souscrire ou de s'opposer à un objet idéal afin d'en donner une nouvelle actualisation. Ainsi, concevoir une

automobile est alors nécessairement concevoir un véhicule à quatre roues doté d'un moteur et d'une direction à volant, sans quoi l'on conçoit autre chose et l'on sort du projet. L'hylémorphisme est très prégnant dans le design industriel, en cela que ce qui définit et permet de classer un objet ce sont ses caractéristiques. Et les caractéristiques principales de cet objet seront celles qui déterminent sa cause finale, sa raison d'être, faisant ainsi de la versatilité une capacité de l'utilisateur à détourner les objets et non, comme chez HOBBS et al. (2008) une qualité du système.

Si l'on considère le design sous un angle matérialiste, il n'est pas question de nier l'existence des formes. En réalité, le matérialisme force à considérer la forme comme une donnée accidentelle de l'individu là où l'hylémorphisme en fait une composante de sa quiddité. La forme est alors ce qu'on pourrait appeler une *organisature*, c'est à dire le produit d'une organisation¹⁷ et cela au delà de toute considération liée à la viabilité du système. Cette organisature est alors autant influencée par la manière dont s'effectue l'organisation que par les caractéristiques des systèmes qui la composent. Il est donc primordial, non seulement, d'en connaître les caractéristiques mais également les relations en établissant une ontologie du domaine.

¹⁷ Comme la musculature ou la denture sont les produits de la musculation ou de la dentition.

*
**

Il faut avoir à l'esprit qu'il existe autant de manières de faire des ontologies que d'ontologues. Cela constitue le problème central de l'usage de ces méthodes en informatique appliquée, dans la mesure où elle pose les mêmes difficultés que l'étude d'un domaine métier en ergonomie¹⁸, à savoir qu'elle est très sensible à la subjectivité de celui qui observe et décrit le domaine.

¹⁸ On peut même, par extension, considérer cela comme l'établissement d'ontologies non strictement formalisées.

Dès lors, comme existent des théories de la justification qui peuvent être distinctes des théories de la découverte, peut-on distinguer une "ontologie de conception" d'une "ontologie de recherche"? Si l'on considère qu'une ontologie est en réalité un réseau de concepts liés entre eux par différentes relations possibles, il est aisé de voir comment certaines catégories d'ontologies peuvent être construites sur la base des catégories d'objets retenus comme pertinents et/ou sur la base de relations retenues elles aussi comme pertinentes.

Ainsi la première position à éclaircir lorsque l'on cherche à établir ce modèle des relations entre objets est leur rapport à l'intentionnalité. Poser l'hypothèse d'une cognition computationnelle revient à poser la factualité de l'intentionnalité dans le monde en raison du codage et de l'objectivité du message. De la même manière, la causalité aristotélicienne suppose l'intentionnalité de la cause vers l'effet. Poser le problème, comme nous le faisons, en termes de systèmes complexes plongés dans un réseau de causalité événementielle impose de refuser toute intentionnalité.

En effet, ce qui fait l'événement, c'est l'observation de cet événement. Mais cette observation se fait en rapport aux corpus idéologiques que l'on a mis en évidence.

Les appareils théoriques décrits dans le chapitre 2 décrivent la signification de concepts tout en contenant la justification théorique et pratique de cette signification. En cela ils constituent la source d'une connaissance empiriquement fondée des objets d'études de la discipline intéressée. Si la théorie est bien faite, il est possible de considérer comme acquis certains éléments de ces appareils. Ce que l'on obtient ainsi est un réseau simplifié dans lequel une bonne partie de la justification est considérée comme tacite et contient les concepts et justifications empiriques. On peut, sur la base de leur pertinence, retirer ces justifications non pas parce qu'elles accèdent à la dignité des théorèmes mais pour la raison que l'on considère certaines d'entre elles comme suffisamment éprouvées pour que l'on en puisse dériver une idée vraie, c'est à dire une idée qui permette d'affirmer ou de réfuter la signification d'un concept. On crée ainsi un réseau dans lequel certaines hypothèses n'apparaissent plus et qui ne contient plus que les concepts et leurs relations certifiées.

Dans le cas idéal, une fois ces deux opérations effectuées, notre appareil théorique ne devrait plus contenir d'éléments de justification et serait par conséquent une ontologie au sens fort du terme. Il est toutefois bien évident que ce cas idéal a bien peu de chances de se présenter au concepteur qui va très certainement être confronté à une ontologie polluée par des justifications insuffisantes et des exigences de preuves empiriques insatisfaites. Ceci correspond en fait au retour, depuis une théorie de la justification, à une théorie de la découverte et constitue l'un des moteurs du progrès scientifique et technique dans la mesure où pour

modéliser correctement les éléments du domaine, de manière proprement effective, une ontologie "pure" est nécessaire sans quoi l'on est confronté à un appareil théorique provisionnel qui engendre de l'incertitude dans le modèle.

Il y a alors une tension entre design et science qui se manifeste ici, dans la mesure où la science met l'accent sur ce qu'elle peut prouver alors que le design doit, comme l'on vient de le voir, tenir compte de ce qui n'est pas encore prouvé, ce qui n'est pas prouvable et ainsi fournir des solutions permettant de circonscrire les problèmes liés à ces lacunes dans la théorie de la justification. Cela constitue le caractère "créatif" de la démarche de conception dans le design industriel par exemple.

*
**

ALORS qu'est ce qu'une ontologie de conception ?

Pour un système donné, elle permet de décrire son organisation à partir d'une épistémologie donnée, et d'un système de connaissance donné. Elle contient donc l'ensemble des éléments conceptuels qui permettent de fonder le cadre théorique justifiant des hypothèses de conception.

Ceci la caractérise en relation avec le statut du prototype¹⁹ comme assemblage de systèmes techniques connus dans l'optique d'en interroger et spécifier le comportement. En effet, ces ontologies sont en fait généralement issues de la fusion de différents appareils théoriques relativement restreints plutôt que de la délimitation d'un seul appareil vaste. Dès lors, si les méthodes permettant le passage d'une théorie de la justification à une théorie de la découverte demeurent valides et pertinentes, s'ensuit le problème de l'homogénéité de l'ontologie dans la mesure où il est nécessaire de s'assurer que la signification des concepts se fait sur des bases compatibles, de sorte que l'utilisation de certains d'entre eux peut entraîner des conflits et par conséquent menacer la cohérence de l'ontologie.

¹⁹ Cf SIMONDON (1958) sur la définition de prototype.

CHAPITRE 2

Concepts et Fonctions

COMME on l'a vu au début de cette partie, les notions de concept et de fonction doivent être considérées différemment d'autres notions, en cela qu'il sont nécessaires à la description des choses, ce qui les rend structuraux. Il est donc important de définir ce que l'on entend par concept et par fonction avant de pouvoir exprimer la conception comme une organisation de fonctions permettant à un système d'atteindre le but voulu de la manière voulue.

Ceci va nous permettre d'établir de façon explicite un positionnement vis à vis de certains problèmes touchant à la polysémie de certains termes ou bien à la signification qu'on leur attribue en relation avec leur importance historique et idéologique.

2.1 SUR LA NOTION DE CONCEPT

2.1.1 NOTION, CONCEPT, TEXTUALITÉ

AFIN d'éviter une inutile régression à l'infini, nous utilisons ici le terme de *notion* en son sens le plus usuel, qui dérive, selon Gaffiot, du latin *nosco* qui regroupe les actes liés à la connaissance et à l'intellection. En un sens abstrait une notion est donc une connaissance plus ou moins floue à propos de quelque chose et posséder une notion de cette chose revient donc à être capable de l'appréhender abstraitement. En ce sens, avoir la

notion d'un chat revient de façon indifférenciée et non exhaustive à voir un chat, connaître la définition de la félinité ou bien se référer à un animal particulier, en somme une idée mentale liée à un chat concret ou abstrait.

Cette *notion* est insuffisante pour considérer la connaissance transindividuelle qu'est la science. Peu importe, en effet, que la connaissance scientifique s'exprime de façon orale ou écrite, elle le fait au sein d'une langue et à partir de définitions nécessairement précises. Peu importe ici que cette connaissance soit difficilement compréhensible ou bien qu'elle soit reçue de façon très variée par les individus, elle prend toujours la forme du texte et c'est cette forme qui nous intéresse ici¹. En pratique seul reste le texte écrit et, contrairement à sa dénomination, l'histoire des idées demeure principalement une histoire des textes.

¹ On notera qu'en tant que suite de signes linguistiques, le texte peut très bien être oral.

Il est donc nécessaire de disposer d'un objet qui permette d'aller au delà de la notion à travers un objet linguistique susceptible d'être utilisé par un groupe d'individus, afin de communiquer en s'assurant qu'ils désignent la même chose de la même manière. Le concept va remplir cette fonction lorsqu'on l'utilise dans une acception contemporaine. En effet, en ancien français notion et concepts sont synonymes mais une divergence de sens va s'établir au cours du temps pour donner au concept une dimension d'objectivité et de durabilité. C'est ainsi que l'on dispose aujourd'hui d'une définition qui le pose comme étant le résultat de la représentation d'une chose concrète ou abstraite munie d'un support verbal. Ce support verbal, à laquelle nous préférons l'adjectif textuel est le nom du concept, ce qui permet d'en établir la notion chez le locuteur.

*
**

La distinction généralement faite en grammaire entre nom propre et nom commun est essentiellement liée à cette référence à la notion, le nom commun a un référentiel générique et le nom propre un référentiel particulier mais tous deux fonctionnent de la même manière. L'usage du nom propre "Emile Ajar" renvoie certes à un être humain dont l'existence particulière est bornée dans l'espace et le temps mais elle utilise tout de même un concept de "Emile Ajar" dont le contenu notionnel va varier selon les locuteurs, par exemple en fonction de leur connaissance de son portrait, de sa bibliographie, de sa biographie, etc.... De façon complémentaire, si pour un bon nombre de locuteurs adultes les noms

propres "Emile Ajar" et "Romain Gary" ont la même signification, il n'en va pas de même pour un élève du cours élémentaire qui n'a pas encore appris cette synonymie. Il faut alors prendre garde lorsque l'on considère la relation du concept à l'en soi de ce qu'il désigne car elle n'est en fait qu'illusoire. En effet, le lien entre concept et notion est un lien de représentation. Il faut prendre ici le terme de représentation au sens littéral, c'est à dire que le rôle du concept est de présenter *de novo* une notion au locuteur. Il n'est donc pas question ici de se placer dans le champ de la cognition ou des neurosciences mais sur un plan mental, au sens large, c'est à dire au niveau pragmatique de l'usage du concept.

Alors, paradoxalement, ce que désigne un concept n'est jamais dans les faits qu'un particulier. Cela vaut aussi bien pour le concept du carré que celui du roi d'Angleterre, car ce particulier n'est pas un objet qui serait fixé de toute éternité et auquel l'on se référerait de façon transcendante dans une sorte de conscience collective ou distribuée. Les diverses formes que prend cette position sont généralement regroupées sous le terme de "réalisme". Ces doctrines ont en commun de postuler l'existence d'un monde objectif auquel il est possible de se référer pour juger de la vérité ou de la fausseté d'une assertion. Mais comme on l'a vu, le concept ne fait en pratique que réactualiser quelque chose de mental et de privé qui est un particulier sujet à des modifications au cours du temps. Dès lors, la signification objective d'un concept est en pratique moins collective que trans-individuelle puisqu'elle se construit par accrétion et non par distribution. Cette position, de laquelle nous nous rapprochons ici est généralement connue sous le nom de "nominalisme" et refuse d'admettre la possibilité de références à une réalité objective transcendante de quelque manière que ce soit.

Bien évidemment, ces deux définitions du réalisme et du nominalisme sont très schématiques et il n'est pas question ici de trancher la querelle. Le problème historique du nominalisme est de concilier l'affirmation qu'il n'existe que des points de vue particuliers sur les choses, y compris mathématiques, et le fait irréfutable que la communication entre individus est possible et fructueuse. Ce problème se dissout de lui-même dès lors que l'on arrête de réfléchir à la pensée intentionnelle comme prenant la forme d'un contenant intellectuel et d'un contenu réel en considérant une métaphore des tiroirs déjà dénoncée par BERGSON (1908). En effet, le concept se place entre la notion et le texte et non pas entre la notion et la

chose. À proprement parler, les concepts n'existent pas car ils sont "dans les textes", non pas en qualité d'objets linguistiques mais comme relations entre plusieurs de ces objets et des notions.

En ce sens, tout concept est donc un noème en cela qu'il est l'unité de sens de base d'une langue qui sans cela ne serait qu'une série de symboles. Il est ainsi possible de mobiliser des significations objectives plus ou moins complexes et ainsi de décrire le réel. Cela fait du concept un objet fondamentalement hypertextuel dans la mesure où il n'existe que parce qu'il synthétise d'autres objets linguistiques à l'intérieur d'un corpus en leur donnant un nom. Cette dimension hypertextuelle fait du concept une entité abstraite, non purement linguistique et non purement mentale. Cela tient à la relativité individuelle de la notion qu'il mobilise et qui fait la base du comportement culturel, dans la mesure où le sens des mots n'appartient pas à la langue mais aux locuteurs. Tout ce que peut alors faire un auteur est donc de restreindre cette variabilité en créant un réseau plus ou moins explicite de relations entre son concept et ceux déjà disponibles.

Dès lors, le concept est une construction plus ou moins formelle dans la pratique. Conceptualiser, c'est décrire une chose en s'attachant à tenir de côté les contingences particulières que peuvent être une couleur, une taille, une quantité, etc.... C'est donc chercher à construire de l'*en soi* à partir du réel phénoménal, non pas afin de rechercher l'idéalité de la chose que l'on étudie mais véritablement pour nommer la chose de façon générique. Historiquement, les méthodes utilisées pour parvenir à cette généralité ont été nombreuses et discordantes au sujet de la réalité du concept. Le but visé a souvent été la réminiscence d'une Idée éternelle notamment chez PLATON (p. d.-a), mais si l'on considère la question du point de vue d'une épistémologie pragmatique, que le concept fasse référence à une abstraction immanente ou transcendante est absolument équivalent tant que l'on s'astreint à le considérer comme un objet textuel.

La conceptualisation n'est donc pas un acte mental autant mais un processus de pensée. Elle nécessite de regrouper à la fois des notions et des concepts afin de forger un paradigme de la chose que l'on veut fixer. On prend ici paradigme au sens grec pur de παράδειγμα qui signifie exemple. Ce terme de παράδειγμα est par ailleurs forgé sur la base de deux termes grecs, παρά² et δείκνυμι³, ce qui met bien en évidence la

² Avec, à côté de

³ Montrer

dimension déictique du terme. La démarche de conceptualisation est donc l'objectivation d'une notion qui peut prendre diverses formes.

Ces formes peuvent être extrêmement formalisées et spécialisées, comme dans le cas des diagrammes UML, ou bien beaucoup plus laxés dans le cas de la langue naturelle orale. L'enjeu d'une bonne conceptualisation est de permettre l'établissement d'une communauté linguistique de façon générale mais aussi pour les langages dédiés à la technique comme les logiques formelles. Ainsi, lorsqu'elle est correctement effectuée, cette démarche permet de s'assurer de stabilité de la dénotation d'un terme mais aussi de l'absence de connotation⁴.

⁴ Dans l'idéal cette absence serait totale mais dans la pratique elle ne peut malheureusement être que relative dans la plupart des cas.

Résumé

Un concept est un objet linguistique doté d'un sens et d'une dénotation qui permet la communication au sujet d'une chose donnée. Le sens correspond à la description formelle de cette chose alors que la dénotation correspond à l'ensemble des choses dont l'on parle.

Dans une perspective de sémiotique, le concept fait office de *representamen* en cela qu'il est un signe qui tient lieu d'un groupe de signes. Les concepts ne désignent pas seulement des entités abstraites mais, en définitive, des particuliers.

Par nature, le concept est donc culturellement déterminé, en raison des règles qui établissent son sens et qui par conséquent peuvent limiter ou élargir sa dénotation.

La conceptualisation est extrêmement importante pour la conception car elle permet la communication et l'objectivisation de la représentation que se fait un groupe d'un objet donné.

2.1.2 CONCEPT ET CONCEPTION

La conception n'est pas la démarche inverse de la conceptualisation mais un usage complémentaire des concepts. Le terme provient du latin *conceptio* et s'utilise à la fois sous sa forme nominale et verbale. On l'a vu, sous la forme nominale la notion renvoie originellement à un synonyme de notion. À l'origine toutefois, la notion est formée par l'adjonction du préfixe *con* au verbe *capiō*⁵, pour créer *concipio*, qui signifie donc à la fois recevoir et contenir, ainsi que pour désigner le fait, pour une femelle vivipare, d'être en gestation. Il s'agit donc un synonyme de transporter. Ici aussi la forme verbale et la forme nominale sont très liées. Ce double usage qui perdure dans le latin chrétien et qui va demeurer dans le français n'est pas anodin, dans la mesure où il renvoie au rôle de la divinité comme créateur des choses et détenteur des Idées vraies. Cela correspond à la négation de la capacité individuelle de création de l'humain, création qui n'est toujours qu'un acte divin. Toutefois, l'analogie biologique avec la gestation semble perdurer malgré l'abandon de la dimension religieuse du terme de conception. En effet, ce que l'on tient aujourd'hui pour être la principale acception du terme renvoie à l'établissement des conditions de possibilité de la réussite d'un projet.

⁵ Prendre.

Si l'on poursuit cette analogie de sens, concevoir est donc une activité collective qui a pour finalité la création d'une chose réelle indépendante de ses géniteurs. Il y a donc un mouvement qui va du subjectif à l'objectif et qui produit quelque chose de moins général qu'un concept. En ce sens, l'anglicisme *design* qui provient du latin *designare* s'apparente au moyen-français *désigner* qui se définit comme "Indiquer, signaler, évoquer avec précision" ou "Représenter, symboliser". On peut donc, au delà de la convention de traduction, constater aisément la proxémie avec la notion de conception, à ceci près que, *designer*, c'est concevoir à l'aide d'objets symboliques c'est à dire faire acte de désignation, au sens historique du terme français. Ainsi, dans un souci de simplicité nous considérons les termes de *design* et de *conception* comme synonymes, dans la mesure où la conception d'un objet technique complexe passe aujourd'hui nécessairement par une phase de désignation.

Ainsi ce que produit le design est une chose moins générale qu'un concept mais qui est dotée de propriétés formelles permettant l'objectivité de la communication. Cet objet intermédiaire peut être appelé *prototype*,

dans la mesure où le terme nous provient du grec πρωτότυπος, qui est construit sur la notion de τύπος⁶ qui désigne la marque laissée par un coup et de celle de πρῶτος⁷ qui lui attribue la primitivité. Au sens littéral, le prototype est donc la marque qu'il convient de suivre pour, par exemple, détailler un bloc de pierre de façon convenable. Par extension sémantique, on peut également utiliser la notion pour désigner la gravure dont est issu le coin utilisé pour frapper la monnaie. Le prototype n'est jamais l'objet que l'on va produire bien qu'il s'en rapproche le plus possible, cela tient justement à son statut de produit du design. Alors, si chaque objet technique est considéré comme un individu, il est aisé de voir en quoi le prototype à partir duquel il est produit est plus général que lui, mais également en quoi il est moins général que le concept auquel il se rapporte.

⁶ Type

⁷ Premier

Pour résumer, la démarche de conception consiste à mobiliser des concepts, qui sont des objectivations textuelles des idées de leurs auteurs afin de construire une représentation de ce que l'on cherche à produire. Considérée sous cet angle, l'affirmation que la conceptualisation guide nécessairement la conception devient évidente et cela impose qu'une démarche de conception objective se double d'une analyse des concepts fondamentaux qu'elle mobilise.

2.1.3 HISTORICITÉ ET ÉTUDE DES CONCEPTS

UNE majeure partie des concepts qui permirent de forger notre rapport à l'humain et au monde nous proviennent de la pensée grecque et en particulier de Platon, Aristote ou Plotin. Ce troisième est généralement peu lu, notamment en raison de la difficulté de sa langue. Comme le souligne Bergson dans ses cours au Collège de France⁸, la "tentative néoplatonicienne" est d'établir un syncrétisme entre les deux philosophes grecs majeurs, en tentant de poser une lecture de Platon à travers Aristote en même temps que de commenter ce dernier en termes platoniciens. Cette doctrine néoplatonicienne va connaître une importance diffuse dans la pensée occidentale. Chronologiquement, cette influence se retrouve grandement dans la doctrine de la philosophie chrétienne à travers Augustin d'Hippone⁹ mais influence aussi la renaissance italienne par l'entremise d'humanistes tels que Pic de la Mirandole et le néoplatonisme médicéen au XV^{ème} siècle¹⁰.

⁸ On trouvera les transcriptions de ces cours d'un grand intérêt pédagogique chez BERGSON (1902, 1904).

⁹ On trouvera un exemple frappant de cette influence dans le livre VIII de AUGUSTIN D'HIPPONE (426) du *De Civitate Dei contra paganos* dans lequel est rendu un hommage admiratif à Plotin.

¹⁰ Une description synthétique de cette problématique centrale de la Renaissance florentine a été faite par COMBRONDE (1999).

L'influence du néoplatonisme sur la philosophie scolastique nous intéresse ici assez peu mais son existence nécessite d'être soulignée car elle marque une importance indirecte et déterminante sur la métaphysique et par conséquent sur notre manière de construire des concepts permettant de décrire la réalité sensible. Elle nous intéresse par contre beaucoup lorsqu'il s'agit de Leibniz, en cela que ses apports aux mathématiques formelles sont immenses. Dès lors, des questions se posent sur la fondation métaphysique du calcul ; à quoi sert-t-il ? Que décrit-il ? Comment s'applique-t-il au réel ? Car là se manifeste l'apport scientifique du cartésianisme ; la mathématique sort du champ de la comptabilité pour entrer dans celui de la science en acquérant progressivement une pertinence qualitative.

Il y a toutefois une contingence historique qui complexifie plus avant le problème délicat de la conceptualisation propre à une pensée. Au delà de toute discussion concernant le rôle du langage sur le plan cognitif, il est impossible de penser en dehors d'une langue déterminée. À travers un vocabulaire et une grammaire, cette langue va permettre ou limiter la manière dont les concepts se combinent, s'antagonisent ou se chevauchent et cela pose le problème du contexte culturel d'usage d'un concept qui le rend historiquement variable à la fois dans ce qu'il exprime et dans la manière dont il l'exprime. Cela implique généralement que la traduction d'un concept ne se limite pas à celle de son nom mais qu'elle exige une refondation de celui-ci.

Comme l'explique ROCHETTE (1995), la traduction des concepts grecs au latin a posé d'énormes difficultés aux intellectuels romains et les a conduit à adopter diverses stratégies pour faire face à ce problème. Ainsi, le latin cicéronien se caractérise par une volonté de fidélité au latin au détriment de la littéralité de la traduction. Ceci a pour effet d'amener à une recréation de concepts qui est importante à considérer du point de vue historique car faire cohabiter des concepts grecs avec des concepts latins peut se révéler extrêmement délicat.

S'impose alors un choix important. La tendance naturelle du scientifique contemporain est de considérer tout concept *per se* et *de se*, c'est à dire comme un système de signification clos sur lui-même et rationnellement cohérent. Cette approche possède un intérêt indéniable lorsque l'on considère des concepts explicitement formalisés, dans la

mesure où elle est économe en moyens. Toutefois, même les concepts les mieux formalisés ne sont jamais isolés sans quoi ils seraient par là même infertiles. De cela ensuit qu'il est nécessaire, lorsque l'on cherche à manipuler des concepts complexes comme celui d'homme ou de technique, de tenir compte des idéologies qu'ils mobilisent. Tenir compte des idéologies ne doit, ici, pas être considéré de façon politique mais générale, c'est à dire au sens de l'ensemble des idées auxquelles souscrit un auteur.

Pour cela, l'analyse logique du seul concept ne saurait se suffire. Expliciter un concept, c'est aussi montrer les relations de dépendance que la tradition a forgé afin de créer des réseaux de notions propice à décrire le réel. En ce sens volontairement très général, est philosophie toute description conceptuelle et raisonnée du réel, peu importe la forme qu'elle puisse prendre. La précision est nécessaire car ce qui est aujourd'hui le programme de physique d'un lycéen fut, un temps, œuvre de philosophie naturelle, tout comme l'a été l'ingénierie antique. Cela impose donc de traiter le corpus comme homogène en valeur et non pas selon une division par champs scientifiques, qui, de plus, est extrêmement récente dans la science occidentale, dans la mesure où elle est le produit du positivisme du XIX^{ème} siècle.

Partant, si la logique pure est insuffisante, il faut bien qu'il existe une méthode qui nous permette de mettre en évidence l'évolution des objets conceptuels et par là même leur signification réelle ; ce qu'ils impliquent et ce qu'ils expliquent. Cela impose donc qu'une méthode purement généalogique n'a que peu d'intérêt pour nous si elle ne permet pas d'établir ce que l'on pourra appeler une analyse dianoématique. Le propre d'une analyse dianoématique est de traverser l'évolution du concept considéré comme un produit intentionnel de la pensée, c'est à dire une description circonscrite du réel. Cette approche oblige donc à passer d'une analyse logique à une autre en explicitant les conditions de possibilité d'apparition et d'utilisation de la notion étudiée. Il s'agit alors moins de rechercher l'historicité de ce concept que d'en tirer une phylogénie en mettant en évidence ceux qui lui sont parents et, par là, de façon anhistorique, ceux qu'il est nécessaire d'admettre ou de refuser lors de son utilisation.

2.2 LE CONCEPT DE FONCTION

LA notion de fonction est devenue centrale dans la pensée contemporaine à plusieurs titres en entrant dans les champs lexicaux de l'informatique et des mathématiques. Elle a profité historiquement de la diversification des champs scientifiques pour se disséminer et ainsi atteindre une polysémie subtile. Ce faisant, elle est devenue centrale au sein de la pratique scientifique, dans la mesure où elle a permis et permet encore de structurer les ontologies propres à chacune de ces disciplines, à tel point qu'il paraît inconcevable de penser quelque phénomène que ce soit sans y avoir recours. Pourtant, sous la forme qu'elle prend actuellement, la fonction n'existe pas dans la pensée grecque, pour qui la seule notion proxémique était celle de λειτουργία, qui va continuer à exister pour donner le français *liturgie*. Ce terme, selon LIDDELL et SCOTT (1896), désigne une activité civile ou religieuse quelconque effectuée par un citoyen. Cela va conduire, à travers le christianisme, à l'acceptation actuelle de liturgie, qui désigne les rites et cérémonies d'une religion et non plus sa dimension sociale.

2.2.1 ASPECTS LEXICOGRAPHIQUES

LA notion de fonction dérive du verbe latin *fungor* que Gaffiot traduit par accomplir, s'acquitter de, supporter, achever. De ce verbe, Cicéron va tirer le nom *functio* que l'on traduit par travail ou accomplissement et plus tard en un sens administratif proche de celui de λειτουργία. Cette notion contient en propre l'idée d'une dépense ou d'une réalisation, ainsi accomplir une fonction revient à terminer quelque chose. Il y a alors un parallèle qui peut être trouvé entre *functio* et εἶδος mais il faut prendre garde de ne pas le surinterpréter. L'εἶδος, chez Platon comme chez Aristote gouverne le devenir de l'individu faisant de lui ce qu'il est.

Cette opposition de la forme et de la matière est une innovation propre à Aristote. Il y a ainsi une Idée de l'humain qui conditionne son devenir de l'embryon jusqu'à la mort. L'existence d'un individu est donc ici la réalisation de son εἶδος à travers la matière, qui est un principe contingent et donc une limite. La matière travaille ici contre l'Idée. Cette doctrine pose également que les objets sont le résultat de la mise en relation d'une cause matérielle et d'une cause formelle par des causes efficientes et finales. Pour exemplifier cela, l'analogie avec l'artisanat est révélatrice, notamment à

travers l'exemple de la brique en terre crue. Les causes matérielles de la brique sont la terre et la paille dont elle se compose. Toutefois, une brique n'est pas qu'une réunion d'argile et de paille mais est déterminée par sa forme (μορφή) parallélépipédique, qui est elle-même déterminée par des causes efficientes que sont le maçon et le moule ainsi qu'une cause finale qui est le mur qu'elle va permettre de construire. Ce schéma génétique de l'objet particulier n'est pas uniquement applicable aux artefacts mais l'est aussi aux être vivants pour lesquels l'âme sera la forme. Ainsi, pour un animal, la femelle fournira la cause matérielle, le mâle la cause formelle et l'âme¹¹ issue de l'union des deux sera à la fois cause finale et efficiente.

Exister pour une chose c'est donc, chez Aristote, être le conditionnement d'une matière par une causalité extérieure complexe qui n'existe qu'en lien avec une forme qui caractérise l'essence de cette chose. Il faut prendre garde aux dépendances causales lorsque l'on analyse ce problème. La culture occidentale théiste a pris pour usage depuis plusieurs siècles d'envisager la finalité comme un dessein. Cela est contraire à la pensée d'Aristote, dans la mesure où la cause finale va découler de la forme de l'objet considéré. Alors une brique n'est pas une brique *en vue de* faire un mur, elle a une finalité dans le mur parce qu'elle est une brique. C'est là que se place la limite de l'analogie entre la chose et l'artefact, en cela que l'artefact n'est qu'un cas particulier des choses. Ainsi, le lien entre forme et finalité est une synchronisation plus qu'une subordination, en cela que pour l'individu viable¹² c'est la forme qui crée la fin et l'artisan qui produit la brique trouve son talent non pas dans la conception de cette forme mais dans la manière dont il va lui permettre de se déployer au sein d'une parcelle de matière.

Il y a chez Aristote un ordre des choses, dans la mesure où la statue est *en puissance* dans le bloc de marbre mais que ce n'est que le concours des causes qui va engendrer une statue particulière. Ainsi, chaque chose possède sa place propre dans la nature, non pas parce qu'une divinité en a décidé ainsi, mais parce qu'exister c'est accomplir son εἶδος¹³ dans sa μορφή¹⁴ dans la mesure où la matière¹⁵ agit comme une limitation de la forme. Cette négativité de la matière s'explique par la nécessaire généralité de la forme. Il n'y a pas ici, comme il existe chez Platon, de théorie de la participation à un archétype mais les formes sont identiques les unes aux autres au sein d'un même genre. Ainsi, deux briques ne sont pas deux instanciations d'une briquité abstraite mais deux réalisations distinctes

¹¹ Considérée au sens pré-chrétien d'ARISTOTE (p. d.-b), l'âme (Ψυχή) est <<l'acte premier d'un corps organisé.>> c'est à dire, littéralement, ce qui le rend vivant.

¹² Celui qui peut exister.

¹³ Forme.

¹⁴ Que l'on traduit également par "forme" mais au sens de la *Gestalt* allemande.

¹⁵ ὕλη

de deux exemplaires de la même forme dont les différences individuelles sont de nature contingente et tiennent à la matière dont elles sont issues ainsi que des conditions de leur production.

Il existe donc, dès le départ, une proximité entre fonction et cause finale, qui va se déplacer dans le latin. En effet, la *functio* partage cette idée de réalisation mais la déplace au delà de la métaphysique pour en faire un concept politique lié à la notion de charge. Ainsi en 1762, l'Académie fait mention de cette acception en y ajoutant un usage métaphorique dans la médecine, l'on est en bonne santé lorsque les organes exercent convenablement leur fonction, c'est à dire le rôle qu'ils sont censés remplir au sein du corps déjà considéré comme un assemblage de parties, soit sur le modèle politique¹⁶ soit sur le modèle d'une machine¹⁷. La modernité de la notion se précise alors, en cela que les fonctions représentent l'ensemble des actions qui surspécialise la finalité d'un individu par rapport à celle que lui confère l'appartenance à son espèce.

¹⁶ Chez de LA FONTAINE (1668) par exemple.

¹⁷ Chez de LA METTRIE (1748)

Il faut attendre la toute fin du XVII^{ème} pour que Leibniz théorise la notion de fonction mathématique, en même temps qu'il entreprend une formalisation de l'arithmétique, encore en usage aujourd'hui. En 1718, à la suite de Leibniz, BERNOULLI définit comme la fonction "d'une grandeur variable, une quantité composée de quelque manière que ce soit de cette grandeur variable et de constantes.". Si l'on compare cette définition avec celle que donne actuellement l'Académie : "Relation qui, à tout élément d'un ensemble, fait correspondre au plus un élément d'un autre ensemble." on voit bien en quoi l'évolution s'est faite par l'adoption de la notion d'ensemble mathématique définie initialement par Cantor à la toute fin du XIX^{ème} siècle.

Le problème se résume ainsi : La fonction $f : n \mapsto 2n$ définie sur $\mathbb{N}$ peut historiquement s'interpréter de deux manières. Selon la définition de Bernoulli cette fonction double la quantité n à chaque application alors que la version ensembliste associe chaque élément de $\mathbb{N}$ à un élément unique de $\mathbb{N}_{PAIR}$. Dans chacun des cas, la fonction, en tant qu'entité formelle, a pour but de décrire un changement dans le monde mais les implications quant à la nature de ce changement sont très différentes.

Il n'est pas équivalent de dire qu'une chose change ou de dire que l'on peut la décrire à l'aide de deux objets différents en fonction du temps. En effet, dans le premier cas il y a une description directe du monde dans ce

qu'on appelle un réalisme de la description qui impose de considérer que la fonction descriptive n'est que la transposition formelle du changement réel qui se passe dans les choses. Le second cas correspond à ce que l'on appellera une conception nominaliste de la description, c'est à dire qu'il n'est pas question de nier l'existence d'un changement dans les choses mais d'affirmer que la description de celui ci se fait à travers des moyens conventionnels, comme, par exemple, un formalisme mathématique et une base numérique donnée.

*
**

Des lors, la notion moderne de fonction permet une chose difficile auparavant qui est la description d'une phénoménalité¹⁸ continue à l'aide d'un système formel discret. Auparavant, il n'était possible de considérer la représentation discrète du monde qu'à travers la théorie cartésienne de création continuée (1641). Cette dimension discrète est importante, dans la mesure où elle permet de formaliser l'évolution de la Nature et des phénomènes que l'on observe se déroulant dans le temps, à travers des paramètres objectifs comme la seconde. Le problème rencontré alors par Descartes est que cette description discrète ne pouvait qu'être le reflet de l'action divine, en raison de son refus de l'infini en mathématiques exposé par JEANGÈNE VILMER (2007).

¹⁸ Ce qui nous apparaît et que l'on peut décrire.

Ainsi avant de disposer du concept de fonction tel que l'on vient de le décrire, il est impossible de décrire ce qui paraît continu à travers un système formel discret sans avoir recours à une thèse sur le caractère réellement discret de l'évolution du monde. S'il est ainsi assez immédiat de s'apercevoir que la conception du temps mise en jeu dans la philosophie antique est une sorte de "durée objective", le fait de considérer celui ci comme un paramètre permettant de décrire deux états successifs de tout ou partie du monde n'est qu'une possibilité très contemporaine. Ainsi la fonction est caractéristique d'un objet et surtout de sa manière d'être dans et d'agir sur le monde à travers plusieurs représentations de celui ci éloignées dans le temps. Alors, elle n'est pas la réalisation de quelque chose d'extérieur à l'objet mais est une partie de son évolution.

On retrouve alors un sujet problématique depuis les débuts de la philosophie ; le rapport de l'essence à l'existence qui est nécessaire afin d'établir la nature des êtres individuels. La philosophie grecque a

cristallisé la notion de substance sous diverses formes qui jouent un rôle majeur dans notre manière d'appréhender les choses. Dans son œuvre, Platon a développé la notion d'εἶδος qui correspond à une identité et un devenir d'espèce. Les Idées sont donc ce qui permet de comprendre la dimension générique du devenir des choses individuelles qui sont dans le monde sensible. On aurait tort, pas seulement en raison de l'anachronisme, de toutefois considérer l'εἶδος comme un avatar du concept car les individus participent de leur εἶδος comme il l'explique dans le Parménide¹⁹ et qui va être contesté par Aristote à travers sa théorie de l'hylémorphisme.

¹⁹ (PLATON, p. d.-b)

L'hylémorphisme pose que chaque chose est composée d'une forme et de matière indéterminée. La matière est ici à la fois limitation et principe d'individuation, en cela qu'elle empêche la forme de s'épanouir pleinement en accomplissant son essence. Ainsi, dans cette conception, deux exemplaires d'un même objet ne sont pas différents simplement parce qu'ils sont spatialement distincts mais parce qu'ils sont individualisés différemment par une même forme générique. C'est la matière qui permet aux choses d'être dans le monde sensible alors que leur forme conditionne la façon dont ils vont nécessairement évoluer, changer et se comporter. Cette théorie métaphysique a l'intérêt majeur de résoudre le grand problème de la cosmogonie grecque qui était celui de la coexistence de l'éternel et du corruptible. Il permet aussi de résoudre le problème de la variabilité individuelle au sein d'un genre.

Comme on l'a vu avec l'exemple de la brique de terre crue, cet hylémorphisme aristotélicien ne repose pas sur une analogie avec la technique, dans la mesure où il cherche à déterminer une manière universelle de rendre compte du changement qui existe dans le monde. L'apport important de Plotin va être ici de tenter de résoudre un ensemble de questions philosophiques propre à ce mode de pensée, notamment celle du rapport entre idéalité et matérialité qui permet l'existence des choses dans le monde. En effet, si la théorie de Platon soulève naturellement la question du statut ontologique du "Ciel des Idées", l'hylémorphisme pose aussi la question de la provenance des Formes qui sont considérées comme existant de fait. La réponse plotinienne à cela est de considérer qu'il existe un principe unique, prééminent aux autres, qui est un créateur incréé. Ce principe, l'Un, doit donc être considéré comme le résultat

d'une dialectique entre aristotélisme et platonisme. Ainsi l'univers est réalisation de cet Un qui se déploie négativement dans la matière.

Cette unification des principes gouvernant l'existence nous intéresse fortement, dans la mesure où l'Un plotinien est le nexus de toute causalité et, par conséquent, la cause universelle. Dès lors, les premiers philosophes chrétiens vont pouvoir assimiler cette idée de cause universelle avec leur croyance en un Dieu unique et omnipotent. Plus important, cette assimilation permet surtout de justifier cette omnipotence, dans l'adoption d'une définition de la divinité comme l'Un personnifié, c'est à dire par l'attribution d'une conscience à ce qui n'était au départ qu'un principe métaphysique. Dès lors, la première cause devient premier agent et, ce qui était la tentative de description d'un ordre naturel, devient celle d'un projet organisé. Ainsi, toute nature est finalement une technique qui dépasse l'entendement humain puisque c'est la divinité qui engendre les choses et que l'humain n'a pas accès au fonctionnement de cette divinité.

À ce moment, la fonction correspond donc au rôle attribué par Dieu à une chose autant qu'à la raison même de son existence. En effet, le Dieu des philosophes est généralement contraint par sa perfection et, tout comme la Nature grecque, ne fait rien en vain mais ne fait rien non plus de général. Cette idée va faire florès dans l'Occident chrétien en tant que fondement principal de la doctrine créationniste. Comprendre la nature ne revenait donc plus à s'interroger causalement mais à se demander comment les choses fonctionnent, dans une démarche de retro-ingénierie. Chaque époque va donc prendre pour paradigme explicatif du corps humain le système technique le plus élaboré disponible. Ainsi prend tout son sens le titre de l'ouvrage fondateur de VESALIUS (1543) : *De humani corporis fabrica*, littéralement "sur la fabrique du corps humain", qui le prend, non pas comme un organisme croissant mais un assemblage terminé, dont l'étude par dissection constitue alors un désassemblage.

En effet, l'ensemble aristotélicien des causes est ici modifié par son usage déiste. Dans cette optique médiévale, l'Univers possède lui même en tant que création une cause finale eschatologique et la cause finale de chaque chose dans le monde est assujettie à cette dernière. Ainsi, la question du pourquoi des choses est résolue dans le mystère de la volition divine. De façon similaire, l'adoption d'une position d'inspiration néoplatonicienne permet également d'attribuer au divin le statut de cause

formelle et efficiente, ce qui les rend également *de facto* surnaturelles. Dès lors, des quatre causes grecques, seule reste analysable la cause matérielle, c'est à dire la manière dont Dieu a implémenté son projet dans la matière.

Ainsi, chez l'automate, il ne manque que la vie comme un ajout et non pas un produit. Il faut ainsi prendre garde à considérer le matérialisme du XVIII^{ème} siècle pour ce qu'il est, notamment chez HOBBS (1651); il ne s'agit pas d'affirmer le caractère biologique de l'esprit humain, contre Dieu, mais de le faire avec lui. Cela se fait donc contre le dualisme, qui postule de façon générale, depuis Platon, que l'âme individuelle et le corps sont deux êtres distincts dont la réunion fait la personne. Mais si l'âme est "mouvement du corps"²⁰, elle ne l'est en définitive que parce que ce mouvement est conçu par Dieu.

²⁰ On reprend ici l'expression à HOBBS (1651) qui, s'il ne reprend pas la doctrine coutumière de l'Église n'en est pas pour autant un auteur athée selon STAQUET (2011).

2.2.2 LE TOURNANT MODERNE

Si l'époque de Descartes marque un progrès technique dans les mathématiques, le concept même de fonction demeure insaisissable au delà de sa dimension formelle. Toute compréhension du monde demeure descriptive et le projet de DESCARTES (1637) de devenir "comme maîtres et possesseurs de la nature" n'est, en fin de comptes, que celui d'un usage conforme et optimal de l'implémentation des causes divines. Ainsi, comme le rappelle RUSSO (1966), la notion de fonction, qui ne peut émerger qu'après que Descartes eut fait le lien entre une courbe et une équation, demeure une simple dépeinture d'un phénomène, tant que le calcul n'est pas envisagé sous une forme algorithmique. Sans cela, l'objet mathématique qu'est la fonction ne dispose pas encore d'une existence autonome.

Il est intéressant que ce fut Leibniz qui fixa ce vocabulaire de calcul. En effet, sa monadologie peu apparaitre comme quelque peu étrange pour son époque. La notion de monade, c'est à dire proprement d'unité ontologique, est bisémique. Pour Leibniz, elle fait référence à la fois à l'unité du Monde et à l'unicité de ses composants. Comme le rappelle BELAVAL (1985), il y a une source plotinienne à la pensée de Leibniz qui se manifeste dans cette idée, proprement moderne, d'unité du monde. On retrouve alors la réduction causale liée au théisme et l'Un devient principe de toutes choses, parce qu'il détermine chaque individualité. Cette détermination se fait par décret de la volonté divine de façon toutefois particulière. En effet, le Dieu leibnizien n'agit pas à travers un "acte unique" mais sa volonté s'exprime

dans le calcul. Ainsi, si l'on considère chaque individualité comme un système d'équations le monde est le système de tous les systèmes. Ce qu'a fait Dieu en raison de son infinie bonté, c'est d'avoir instancié ce système universel d'équations de façon optimale, en égard à son harmonie. Ceci fait que le monde dans lequel nous vivons n'est que la résolution dans le temps de ce système et que la fonction mathématique permet moins d'agir que d'admirer la perfection divine.

Il y a donc en 1700 deux notions de fonction. L'une, juridique, s'applique au social et l'autre, mathématique, désigne la manière de décrire quantitativement un événement dans le monde. Comme on l'a vu, il existe l'assimilation du corps à l'appareil technique, qui se manifeste autant dans la doctrine de Descartes que dans la médecine en général. En effet, la théorie des esprits animaux de DESCARTES (1649) existe déjà chez Galien et dans la médecine grecque. Ce que l'on appelle ici *esprit* n'est pas une intellectualité mais un fluide²¹ et l'adjectif animal renvoie à l'*anima* latin, qui donne le mouvement. La pensée du corps aux XVII^{ème} XVIII^{ème} est alors fortement liée aux techniques hydrauliques. Ainsi, l'ingestion de nourriture avec la digestion est considérée comme le processus calorifère essentiel à la vie de l'individu. Cette chaleur va alors se communiquer au sang et aux humeurs pour les faire bouillir, produisant ainsi les esprits animaux, responsables des mouvements du corps, ainsi que les passions de l'âme chez DESCARTES (1649). Ce que l'on appelle alors *passion* doit se comprendre par le contraire d'*action*, c'est à dire ce qui arrive à quelque chose et, donc, la notion de passion de l'âme désigne la manière qu'a la corporéité d'agir sur l'âme, à travers la glande pinéale²².

²¹ On désignera par ailleurs longtemps l'éthanol par le terme "esprit de vin" en raison de son mode de production par distillation.

²² Chez DESCARTES (1649) en particulier.

Un corps humain est donc, à ce moment, une machine à vapeurs conçue par Dieu et cela rend délicate l'application des fonctions analytiques à sa compréhension. Ainsi, dans une physiologie des humeurs, la notion de fonction va être rapportée au rôle que joue chacun des organes sur les esprits animaux²³. Par conséquent, la médecine théorique de l'époque se limite à une anatomie et une physiologie des fluides. De plus, ces considérations sont confortées par l'expérimentation médicale de l'époque, en particulier par le rôle de pompe attribué au cœur par HARVEY (1628).

²³ Refroidissement, condensation, chauffage, etc....

Pour trouver un dépassement de cette situation, il faut considérer l'essence des travaux de VESALIUS (1543) et des premiers anatomistes

modernes. En effet, la recherche par dissection a alors pour but de rechercher comment est structuré le corps humain de façon générale. Ainsi, par abstraction des particularismes de chaque cadavre, il est possible d'établir un paradigme du corps humain mort qui ne correspond à aucun cadavre particulier. Il en va de même pour les physiologistes modernes qui vont rechercher comment, dans cette anatomie, vont se comporter les fluides vitaux. Ce que va alors faire le praticien sera de se référer à ces schémas de fonctionnement, afin d'établir un diagnostic et une prescription en lien avec les effets supposés d'un principe actif, ou d'une procédure, sur les fluides responsables de la maladie. Ainsi, le chirurgien, fin connaisseur de l'anatomie, devient à cette époque en mesure de comparer son patient à l'atlas médical, afin de juger par quoi il en dévie, donc de pouvoir éventuellement corriger cette déviation.

2.2.3 BIOLOGIE ET FONCTIONS

UNE première avancée va se produire dans la seconde partie du XVII^{ème} siècle lorsque MALPIGHI (1661) découvre les capillaires sanguins, grâce à l'observation microscopique. En effet, même les travaux importants d'HARVEY ne permettaient pas de construire le concept de tissu vivant, puisqu'ils demeurent fondés sur des observations macroscopiques. Cela induit une représentation du corps comme celle d'unités fonctionnelles, liées entre elles par l'équivalent d'un réseau de communication. La découverte des capillaires permet alors de se rendre compte de l'existence d'un réseau sanguin, à l'intérieur même des organes, ce qui est crucial dans la mesure où cela va permettre d'unifier la matière corporelle. Cette unification ne se fera plus sur la base de l'appartenance à un même ordre surnaturel mais sur le constat, progressivement étayé par l'expérience, qu'il existe un "intérieur" de l'organe, au sens d'un fonctionnement complexe, qui va créer son action au sein du corps humain. Cette généralité du vivant ne va toutefois s'établir que beaucoup plus tard avec BICHAT (1800) qui va conceptualiser le tissu biologique.

Cette conceptualisation est d'une grande importance dans la mesure où, possédant le concept de "tissu musculaire", le cœur n'est plus une pompe mais un ensemble de tissus musculaires agissant comme une pompe. Là se réunissent deux notions de fonction qui étaient, on l'a vu, jusqu'alors bien éparses. Car la fonction du cœur est ce qui surdétermine

son existence, comme tissu, et qui est susceptible d'être décrite par une courbe mathématique. Cela permet d'amorcer un changement décisif sur la biologie et la médecine en raison des modifications de celle-ci, à partir de la Révolution, comme le montre FOUCAULT (1963). La naissance de la médecine clinique ainsi que celles des sociétés savantes liées à cette discipline vont changer le regard des médecins sur leur théorie qui va se standardiser autour de l'anatomo-pathologie.

En effet, si la pathologie est longtemps considérée comme une affection, c'est à dire l'action d'une entité extérieure sur le malade, la conceptualisation du tissu va permettre de réfléchir à l'organe en termes de fonctionnement. Ce paradigme va être abandonné grâce aux évolutions de la pharmacologie, conçue comme l'étude de l'influence d'une substance chimique sur les tissus vivants, notamment avec les études de MAGENDIE (1809). L'organe n'est alors plus une pièce détachée dans un assemblage technique mais un tissu dans un ensemble intégré de tissus, la maladie devenant ainsi un ensemble de symptômes. Alors, pour prendre un exemple simple, si dans, la médecine médiévale, la *fièvre* désignait l'ensemble de la maladie, dans une optique de pathologie clinique, elle devient un phénomène lié à l'existence d'une affection, causée par une lésion organique. Ainsi se crée une ontologie de la pathologie, permettant l'axiomatisation de la physiologie et de l'anatomopathologie.

Cela, couplé à l'émergence de la biologie cellulaire, avec SCHWANN (1839) qui pose dans le même temps la similarité de fonctionnement entre le vivant végétal et animal, va permettre de terminer cette phase historique, puisque tout tissu biologique est composé de cellules. Ainsi, tout est prêt pour que BERNARD (1865) fonde la médecine expérimentale et pose deux concepts d'une importance historique cruciale, l'homéostasie et le milieu intérieur. La notion de *milieu intérieur* permet de proprement renoncer à la conception antique de l'organisme comme microcosme, c'est à dire du corps comme représentation du monde, en faveur d'un paradigme biologique. Le milieu intérieur désigne les fluides de l'organisme²⁴, dans lequel sont intégrés les organes, dont l'évolution va déterminer le fonctionnement. Dans cette optique, l'homéostasie représente ce qui caractérise le vivant, en vie, en cela qu'elle est le phénomène dynamique de maintien de la stabilité du milieu intérieur, donc du bon fonctionnement de l'organisme.

²⁴ Sang, Lymphe, Liquide interstitiel.

Ainsi, comme on l'a vu en mathématique et en physique, la notion de fonction demeure absente très longtemps de la théorie médicale et, lorsqu'elle l'est, elle se trouve réduite au rôle des organes au XIX^{ème} siècle. Toutefois, il existe une spécificité notable en médecine, dès la théorie des humeurs, qui est celle de la reconnaissance d'un fonctionnement du corps. Fonction et fonctionnement sont des noms dont le rôle est de désigner le fait de fonctionner pour une chose, c'est à dire en un sens très général de faire quelque chose²⁵. Ainsi, jusqu'à BICHAT, et en particulier jusqu'à BERNARD, le fonctionnement était considéré comme une description utilitaire de la fonction de l'organe. C'est par ailleurs le sens, historique grec, d'ὄργανον²⁶ qui va fournir le terme d'organe, à travers le latin *organum*, qui sont deux termes synonymes permettant de désigner un instrument, qu'il soit artisanal ou musical. Dans sa signification originelle, l'organe est donc ce qui permet à quelque chose, d'extérieur à lui, d'exercer une activité et qui n'a pas d'autonomie d'action. Une fois la théorie cellulaire en place, le paradigme va se renverser puisque l'unité d'action, propre au vivant, va être la cellule et l'organe sera donc, en tant que tissus, un ensemble de cellules. Ce qui va donc distinguer un organe donné d'un autre n'est pas son "usage" mais le type de cellules qui le constituent et la manière dont celles-ci sont organisées. Le fonctionnement passe donc du statut de cause finale à celui de conséquence de l'activité cellulaire, ce qui a de grandes implications concernant la fonction organique.

En effet, la fonction correspondait à l'"usage" de l'organe, dans une optique créationniste, mais elle devient descriptive avec la médecine expérimentale. La construction du concept d'homéostasie par BERNARD (1865) doit par ailleurs se comprendre par une donnée culturelle, dans la mesure où le XIX^{ème} siècle a vu l'émergence d'une thermodynamique constituée, qui permet de concevoir la chaleur comme une forme d'énergie dès les travaux de Rumford mais surtout de constater et de formaliser, mathématiquement, les échanges et les conversion énergétiques avec JOULE (1843). Dès lors, la chaleur cesse d'être une propriété des choses pour devenir un phénomène conséquent au fonctionnement de celles-ci. L'énergie acquiert un caractère fondamentalement relationnel, ce qui permet de comprendre le concept d'homéostasie comme un équilibre énergétique du milieu intérieur, dont les paramètres vont conditionner l'activité des cellules et des tissus.

²⁵ La linguistique distingue la construction de noms dits déverbaux par deux moyens, la dérivation et la substantivation. On considère alors comme objet de base un verbe, c'est à dire ce qui permet de désigner un événement observable. Ainsi, on définit *fonctionner* en français moderne comme le fait de remplir un rôle. Par substantivation, *fonctionner* va donner *une fonction* et par dérivation *un fonctionnement*.

²⁶ Organon.

Il serait toutefois inexact de dire que BERNARD physicalise la biologie ou la médecine. L'énergétique du XIX^{ème} siècle éclaire la dimension dynamique de son paradigme du corps. En effet, le mécanisme prévalent jusque alors reposait sur un schéma causal statique linéaire, dont la régulation était généralement assurée par un mystère. Le nouveau schéma causal dynamique que permettent les conclusions de la médecine expérimentale est nécessairement non linéaire. En effet, chez BERNARD, le fonctionnement individuel de chaque organe va influencer le milieu intérieur, qui va à son tour influencer d'autres organes. Ce que l'on appelle *milieu intérieur* est un ensemble de liquides constitué du sang, de la lymphe et du liquide interstitiel, dont les modifications impactent le fonctionnement général de l'organisme. De plus, ces influences ne se font pas en vertu d'une cause transcendante mais à travers des phénomènes qui sont, également, proprement biologiques. Ainsi, la maladie n'est plus directement cause des symptômes mais peut être décrite comme l'influence d'un événement, circonscrit dans l'espace et dans le temps, dont les conséquences sont susceptibles de modifier le fonctionnement d'organes distants.

La question qui reste à régler à cette époque est celle de l'organisation de l'organisme vivant mais, si l'on considère son existence de fait, la fonction biologique doit déjà être considérée comme une abstraction du fonctionnement des appareils organiques. Le mot fameux de LUCRETIVS CARUS (p. d.) selon lequel "c'est l'organe qui crée l'usage" trouve alors une signification renouvelée, puisque ce que l'on entendait alors par usage se nomme désormais fonction.

*

**

Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, nous voyons donc qu'existent deux notions de fonctions ; l'une, issue de la physique mathématique, l'autre issue de la biologie. Ces concepts, s'ils finissent par désigner tous deux le comportement d'une chose ne le font pas de la même façon, dans la mesure où la physique peut facilement appliquer un cadre descriptif, discret, à ses objets et ainsi résoudre de manière satisfaisante le "paradoxe de la Flèche", établi par Zénon. Ce paradoxe s'énonce simplement :

Si l'on tire une flèche, celle-ci est toujours immobile. En effet, selon ARISTOTE (p. d.-c), « Tout ce qui occupe un espace égal à soi même est en repos, et tout ce qui est en mouvement est toujours dans un maintenant ». Comme la flèche se trouve à chaque instant dans un espace égal puisqu'elle ne change pas, elle ne peut pas être en mouvement car à chaque instant infinitésimal elle restera en repos. Dès lors une flèche qui atteint sa cible sera passée par une succession infinie de positions de repos ce qui implique que le mouvement n'est pas celui de la flèche mais de l'air qui la contient pour ARISTOTE (p. d.-c).

On l'a vu, la géométrie analytique cartésienne permet de construire une représentation du continu, susceptible d'être calculée en fonction de paramètres discrets. Alors le paradoxe de la flèche n'a plus lieu d'être, puisque l'on étudie le mouvement comme résultat de la série des positions et non plus en lui même. Ainsi, la *vitesse instantanée*, qui correspond à la dérivée de la trajectoire en un point donné, n'appartient pas à l'objet mais à son mouvement, en tant qu'abstraction.

Cela permet alors, une fois disponible la notion d'énergie, d'établir une physique dynamique, extrêmement intéressante pour l'ingénierie, faisant de la fonction une abstraction simplificatrice du réel. Toutefois, la biologie à l'époque de BERNARD (1865) n'utilise pas ce genre de fonction. La fonction biologique simplifie alors le réel, non pas sur un mode quantitatif mais sur une mode qualitatif, et ce qui est quantifié est l'ensemble des paramètres physiologiques.

**

L'ÉTAPE suivante se pose alors logiquement par une alternative ; faut il réduire le quantifiable biologique à un phénomène physique ou possède-t-il une spécificité propre ? Dans sa globalité, la biologie du XIX^{ème} siècle s'est distancée de l'explication déiste, au profit d'une explication phénoménale et empirique, qui trouve son paroxysme chez BERNARD (1865). Alors le mécanisme du XVII^{ème} siècle ne tient plus et l'explication de l'organisation, considérée comme fait acquis, en devient plus problématique.

La grande question est alors de savoir s'il existe ou non une "force vitale" qui serait une énergie, parmi celles connues de l'époque, comme la chaleur ou la gravité. Cela va engendrer un hiatus entre biologie et médecine, la première s'occupera des phénomènes à l'échelle tissulaire, de façon expérimentale, alors que la seconde s'occupera du corps organisé. L'abandon du vitalisme scientifique va alors être relativement rapide, dès que le problème de la génération spontanée du vivant sera réglée.

À la suite des travaux de Schwann sur la question, Pasteur va développer les méthodes de stérilisation qui portent son nom, et le poids conséquent que porte sa voix va conduire à trancher la question. En effet, s'il est possible par une procédure physique d'empêcher la croissance de micro-organismes dans un milieu autrement propice, le lien entre l'émergence du vivant et la physique est établi. Cela tient à la présupposition que le chauffage n'altère pas nécessairement le contenu d'un flacon²⁷, donc, toutes choses étant égales par ailleurs, que la multiplication des levures ou des vers ne provient pas de ce contenu. Dès lors, si cette multiplication devait continuer à se produire c'est que le vivant se produirait dans des circonstances propices, selon un principe quelconque qui ne dépend pas de la physique ou de la chimie. Or ce n'est pas le cas.

²⁷ En d'autres termes, on veille à éviter la cuisson.

Après cela, la question du vivant se place dans une continuité avec les sciences expérimentales que sont la chimie ou la physique. La "force vitale" ne peut plus être considérée indépendamment du reste des sciences expérimentales. Cela règle donc moins la question du vitalisme plutôt que cela en fait une thèse qui ne peut désormais plus être considérée que comme surnaturelle.

De façon progressive, cela va conduire à l'abandon du vitalisme biologique au cours du XX^{ème} siècle. Toutefois, pour que cela se produise ; il a fallu que les travaux de DARWIN (1859) rencontrent ceux de Mendel, autour de l'année 1900. Cela permet d'avoir une pensée de l'hérédité, qui était fondée sur la transmission de caractères macroscopiques d'une lignée à l'autre au sein d'une population, transmission dont la dimension génétique va être fixée par MORGAN (1915). A partir de ce moment, la génétique moderne va se développer, et, une majeure partie des découvertes va montrer que l'ADN est présent dans les bactéries comme dans les cellules. Ceci produit une unification ultérieure du vivant à celle existant au XIX^{ème}

siècle, puisque elle recouvre une plus grande diversité d'objets mais aussi parce qu'elle ne repose plus sur une caractérisation phénoménologique du vivant. De l'"ensemble des fonctions qui s'opposent à la mort" l'on arrive à ce qui est l'expression d'un matériel génétique.

Cet abandon du vitalisme et l'émergence de la génétique vont modifier le rapport à la fonction dans la pensée médicale. En effet, si elle demeure une abstraction du fonctionnement organique, ce dernier est causé par le comportement des tissus. Le comportement des tissus est déterminé par leur organisation et celui des cellules qui les composent et les protéines jouent un rôle central dans ces phénomènes, ce que montrent JACOB et MONOD (1961).

S'ajoute à cela deux notions fondamentalement contemporaines qui sont celles d'intégration et de système. Si comme on l'a vu, l'anatomie a depuis très tôt cherché à étudier des "appareils", ce qui la caractérise est essentiellement l'isomorphisme existant entre le fonctionnel et le spatial. Ainsi, ce qui est matériellement lié est fonctionnellement lié. La notion de tissu biologique puis celle de spécialisation cellulaire vont rapprocher les différents organes les uns des autres, d'une part en les traitant comme différentes configurations de tissus similaires, puis, comme différents groupement complexes de cellules génériquement identiques.

Ainsi, ce qui fait le tissu est à la fois le type de cellules qui le composent mais aussi la façon dont elles vont interagir, entre elles et avec d'autres cellules. Si l'on considère le vivant comme exhibant différentes spatialités, l'on s'aperçoit que la complexité qui le caractérise se simplifie si l'on aborde son étude, non comme celle d'objets constitués²⁸, mais, comme celle de systèmes dynamiques au sens de L. v. BERTALANFFY (1968). Les systèmes bertalanffiens sont, par essence, des systèmes ouverts, en communication avec d'autres systèmes, ce qui contribue au rapprochement de la notion de fonction mathématique avec celle de fonction biologique. L'on peut désormais considérer que l'abstraction du fonctionnement peut, en droit, être décrite à travers différents systèmes d'équations, liés les uns aux autres par des variables communes, et structurés selon une relativité d'échelle spatio-temporelle qui est liée aux différentes spatialités du corps vivant, organisé par la phylogénèse et lors de l'ontogénèse et de l'épigénèse.

²⁸ Ce que les anglo-américains nommeraient *ready made*.

Il faut alors à ce stade considérer le vivant comme un ensemble de phénomènes physico-chimiques. Cette affirmation ne suffit toutefois pas à rendre compte de ce nous apprend la génétique, si l'on considère le rôle des gènes dans la productions de protéines qui vont surdéterminer le comportement de certaines cellules. De plus, ces gènes s'expriment ou se répriment en fonction de paramètres environnementaux et d'un grand nombre de facteurs. Le gène n'est donc pas l'équivalent d'une carte perforée, dont le décodage dans le temps entraîne un phénomène de façon univoque, mais une partie d'un système qui va entrer en résonance avec ce dernier, au cours de son évolution dans un environnement déterminé.

Dès lors, il serait fallacieux de considérer la biologie dans un modèle physique *bottom-up* pur dans la mesure où ce qui se produit à une échelle spatiale donnée influence la totalité du système à des échelles supérieures comme inférieures, par l'intermédiaire du milieu intérieur qui constitue une discontinuité structurale permettant la propagation d'un phénomène donné dans certaines circonstances. Par conséquent, si un phénomène simple donné est une réaction physico-chimique, sa mise en système avec d'autres phénomènes, qui va engendrer un niveau d'échelle supérieur, n'est ni physique ni chimique mais proprement biologique. Ainsi le concept contemporain de fonction biologique, qui ne peut exister sans l'ensemble des concepts disponibles avant 1961, correspond à l'intégration de différents phénomènes physico-chimiques, descriptibles dans un système d'équations. De la même manière qu'un système peut participer de plusieurs systèmes, une fonction peut participer à plusieurs fonctions.

Le problème qui se pose alors est de comprendre comment formaliser et établir l'intégration de plusieurs phénomènes au sein d'une même fonction. Il faut tout d'abord prendre garde à distinguer intégration et organisation. L'intégration, c'est à dire l'existence de l'organisme en tant que système constitué de sous système, est ce qui permet au système de perdurer dans son environnement, est une modalité de l'organisation. En effet, d'un point de vue nominaliste, il n'y a de structure que pour qui observe une structure. De plus cette structure observée va varier en fonction des connaissances de l'observateur. Ainsi, schématiquement, pour un profane, il y a bien peu de différences entre un chirurgien qui réalise une greffe cardiaque et un garagiste qui remplace une pompe à air, alors qu'il y a, pour un médecin, toutes les différences imaginables.

Mais comme on l'a vu, l'organisation du corps est dynamique. Cela tient au caractère perpétuel des intégrations entre les différents systèmes biologiques dans le corps, qui engendrent ce qu'on appelle, à tort, des réorganisations. Ainsi, comprendre l'intégration c'est comprendre l'organisation dans son évolution. L'acquis de la biologie contemporaine, est la fluctuation, car observer l'ontogenèse n'a rien à voir avec observer le développement d'un jardin, dans lequel l'on a au préalable posé un plan d'organisation et dont le développement et les aléas vont modifier ce plan initial. Toutefois, si l'organisation est fluctuante, comment expliquer la stabilité relative manifeste du corps ?

L. v. BERTALANFFY (1968) définit les systèmes biologiques comme métastables et équi-finaux. Un système métastable est un système dont l'équilibre n'est pas une valeur fixe mais une plage de valeurs. Lorsqu'il est déséquilibré, ce type de système va osciller dans ce domaine de stabilité sans s'effondrer. Un système équi-final est un système dont l'état final peut être atteint à partir de divers états initiaux, différents, et de plusieurs manières possibles. Ces deux concepts permettent de répondre au finalisme apparent des systèmes biologiques, qui ne sont pas construits pour atteindre un but, mais, dont l'évolution est suffisamment contrainte par les circonstances pour qu'ils adoptent un état final qui permette leur perpétuation dans le temps.

Le corps vivant n'est donc pas stable mais dispose d'un domaine de métastabilité important, lié à sa complexité d'organisation et à l'équi-finalité des systèmes qui le composent. Affirmer cela ne répond pas à la question, puisque l'on sait que l'augmentation de la complexité s'accompagne généralement d'une augmentation de l'entropie et donc une diminution de la stabilité.

CHAUVET (1993a) montre que cette question de l'entropie se pose différemment en biologie par le Principe d'AutoAssociation Stabilisatrice²⁹. Ce PAAS constitue la base de la théorie causale de l'organisation de Chauvet et postule que deux structures physiques, au voisinage l'une de l'autre, peuvent interagir de façon à engendrer une structure plus stable qu'elles, c'est à dire qu'elle sera plus résistante aux vicissitudes de son environnement. À un niveau fondamental pour le vivant, la cellule représente déjà une structure complexe, composée de différents éléments qui peuvent être décrits comme des phénomènes physico-chimiques. Or

²⁹ Abrégé en PAAS

pour un phénomène physico-chimique, l'augmentation de la stabilité n'est rien d'autre que sa propre perpétuation.

Deux phénomènes physico-chimiques n'interagissent pas de façon directe mais au travers des produits de leur fonctionnement, ce qui conduit à considérer cette interaction comme nécessairement non symétrique. De la même façon, si cette interaction se produit par la médiatisation d'une structure tierce, celle-ci doit nécessairement se trouver dans leur milieu commun et, par conséquent, l'interaction est non locale, se faisant à distance.

Comme le montrent FASS et GECHTER (2015) il est nécessaire de distinguer ce type d'interactions, propres à la biologie, de celles qui sont propres à la physique. CHAUVET (1995) nomme ce type d'interaction "fonctionnelle" et propose d'en formaliser la description. Ce qui est désigné sous le nom d'interaction fonctionnelle est la structure médiatrice entre deux phénomènes physico-chimiques. Le phénomène qui va émettre l'interaction sera nommé "source" et celui qui la reçoit sera nommé "puits".

Dès lors l'interaction entre une source et un puits n'est pas une interaction, au sens classique du terme, entre deux objets mais entre l'évolution de la source et l'évolution du puits. Elle n'est donc pas liée à une quelconque intentionnalité, dans la mesure où ce qui va la définir sera l'influence qu'elle aura sur le puits. Cette manière de conceptualiser l'interaction biologique fournit la dernière étape dans le rapprochement entre mathématique et biologie, car la fonction d'un objet biologique quelconque sera l'ensemble des interactions fonctionnelles dont l'existence permet l'observation, c'est à dire son rôle au sein de l'organisme, considéré de façon non finale, en relation à sa significativité, c'est à dire de l'impact de son existence sur l'ensemble du système.

La significativité d'une abstraction n'est pas une signification, c'est la capacité à assumer une signification par le locuteur. Afin de comprendre pleinement cette logique du vivant, il faut donc raisonner de façon non causale mais événementielle, en cela que la fonction ne désigne pas les choses selon leurs causes les unes sur les autres mais selon les conséquences de leur fonctionnement.

Résumé

La fonction est l'abstraction du fonctionnement. Elle permet de décrire l'ensemble des interactions en œuvre dans le comportement d'un système. Ainsi elle permet de modéliser l'évolution d'un système technique à partir de ses spécifications et de son état d'origine vers son état final.

Dans le vivant elle permet de décrire l'évolution d'un système en fonction de son organisation et de la dynamique de ses sous-systèmes. En tant qu'abstraction, elle est un objet fondamentalement linguistique qui permet de formaliser des événements de façon à en avoir une compréhension synthétique.

Le concept de fonction est extrêmement contemporain et est peut être lié à la notion d'interaction. En tant qu'abstraction, la fonction est donc ce qui permet de conceptualiser un ensemble d'interactions et, par là, de décrire un objet.

Il faut distinguer les fonctions biologiques des fonctions physiques ; les premières décrivent un ensemble d'interactions asymétriques non-locales et les secondes un ensemble d'interactions symétriques et locales.

CHAPITRE 3

État de l'art : Analyse conceptuelles des trois concepts de l'IHM

Il y'a trois questions fondamentales qui se posent aux théoriciens, et dans une moindre mesure aux praticiens, dans le domaine de l'Interaction Homme-Machine¹

¹ Abrégé en IHM dans la suite.

1. Qu'est ce que l'humanité ?
2. Qu'est ce que la machinité ?
3. Qu'est ce que l'interagir ?

Ici comme ailleurs, il est salvateur de prendre garde à la grammaire et à la terminologie utilisées. Ainsi la question de l'humanité n'est pas celle de l'humain, qui concerne la zoologie. Toutefois, et comme on l'a vu dans l'introduction, appréhender l'humanité ne se fait jamais sans relation avec une certaine définition de l'humain², entendu que celle-ci va poser les bases et les limites de notre caractérisation. Dès lors les notions d'humanité et de machinité n'appellent pas tant des réponses prenant la forme d'une définition *a priori* mais celle d'une caractérisation de ces deux modes d'*être au monde*³ des choses.

² Une anthropologie

De façon similaire, l'interagir n'est pas l'interaction en cela qu'il est considéré comme une activité des choses et non pas une cause extérieure. On voit alors bien comment ces trois questions peuvent être synthétisées au sein d'un problème plus général qui est celui de l'essence

³ On parle d'être au monde à partir d'HEIDEGGER (1927) comme la manière caractéristique d'un étant (une chose) de se déterminer dans sa quiddité et son haecité non pas en raison d'une cause extrinsèque (Une Forme (εἶδος) ou bien une substance individuelle transcendante.) mais en raison des conditions de son développement et de son existence.

de l'anthropotechnique, lui même considéré comme un mode d'être au monde.

3.1 L'HUMAIN

Le terme même de psychologie est une création de la fin du XVI^{ème} siècle qui marque alors le point de départ d'une inflexion depuis la philosophie de l'esprit jusqu'alors prévalente à une discipline codifiée selon des méthodologies scientifiques. Ce processus graduel atteindra son résultat le plus significatif au XIX^{ème} siècle avec l'apparition de véritables écoles de pensée scientifiques dans le domaine. Le lien entre psychologie et anthropologie représente un enjeu majeur à cette époque pour construire ce qui vont devenir les Sciences Humaines et Sociales⁴.

⁴ Abrégé en SHS

Toute pensée des SHS est fondée sur une anthropologie et, par conséquent, sur une psychologie, que cela soit une prise de position sur la primauté de l'individu sur le groupe, sur l'existence et les propriétés d'un inconscient de quelque nature ou bien encore sur la supputation d'une cognition humaine qualitativement différente de celle du reste du règne animal. Dès lors la réponse à la question "Qu'est ce que l'humanité ?" prend, en droit, autant de formes qu'il y a d'écoles de pensée. La structuration de la psychologie comme science autonome au XX^{ème} siècle va toutefois conduire à une densification de certaines de ces anthropologies qui vont conditionner la recherche scientifique aussi bien dans les SHS que dans la médecine ou l'ingénierie.

Ainsi, dans NAZIN et FASS (2015) nous avons restreint le nombre de ces courants possibles à cinq selon la partition généralement admise en histoire de la pensée⁵. A partir d'une analyse bibliographique, une grille de comparaison de ces différents courants a été établie (cf. Tableau 3.2).

⁵ Behaviorisme, Cognitivism classique, Connexionnisme, Cybernétique et Intégrativisme. Le courant intégrativiste représente ici la position que nous défendons dans cette thèse et que nous avons schématisée pour les besoins de l'étude.

Ces anthropologies, bien que très rarement définies explicitement, sont autant de réponses à la question de l'humanité et vont fortement surdéterminer celle de l'agir humain ou de la pensée à travers une prise de position d'ordre ontologique qui va nécessairement influencer notre rapport au monde et à ses objets. Alors en étudiant l'anthropologie psychologique à travers une perspective historique il devient possible de comprendre quelles sont ces théories et surtout d'en analyser les intérêts et les défaillances.

Le fait de concentrer dans la suite cette perspective anthropologique au XX^{ème} siècle n'est pas anodin dans la mesure où l'on peut retrouver dans ces différents courants des influences de ce qui a prévalu auparavant. Ainsi, une prise de position anthropologique dans le domaine de l'IHM aujourd'hui ne sera pas une prise de position réellement historique mais sera fondée sur ce qui revêt actuellement la forme acceptable de scientificité de notre époque à savoir la psychologie moderne si on la conçoit selon la caractérisation qu'en fait Simondon :

« Si la psychologie semble actuellement se perdre dans la cybernétique, c'est parce qu'elle va actuellement à la rencontre d'autres formes du savoir : c'est un signe très important que la psychologie soit amenée à dialoguer avec des techniques ; jusqu'à ce jour elle ne pouvait guère dialoguer qu'avec une seule technique, ou plutôt un seul art, celui de guérir. La psychologie contemporaine, dans sa troisième phase, dialogue avec les techniques récentes, hautement mathématisées, et qui font de l'objet technique un nouveau *socius* pour l'homme ; l'homme rencontre l'objet qu'il a fabriqué non comme ustensile ou objet de consommation, mais comme être dont l'activité est parallèle à celle de l'homme. [...] Et en même temps que l'on reconnaît cet éclatement de la psychologie en anthropologie, on constate une réduction de la distance entre sciences et techniques. Si ce double mouvement s'amplifie, il est possible que la psychologie conçue comme modèle de technique pure devienne un jour modèles des sciences, savoir central. »

SIMONDON, *Fondements de la psychologie contemporaine*, 1956

3.1.1 LE BEHAVIORISME : UN POINT DE DÉPART COMMUN

L'HISTORIOGRAPHIE psychologique fait remonter l'acte fondateur du courant behavioriste, à WATSON (1913), qui repose sur une prise de position radicale vis à vis de la question de l'acceptation de la méthode introspective en psychologie, plus particulièrement dans le champ de la recherche dans ce domaine. Le reproche fait à la méthode introspective est son caractère proprement invérifiable, car les données qu'elle utilise ne sont pas comparables à un état de fait accessible aux chercheurs. De là s'opère la première révolution behavioriste, et le seul véritable héritage de Watson, consistant à constituer la psychologie autour de l'étude du comportement et non plus de la *psyché* humaine.

Ce refus de la subjectivité des données, et de considérer la pensée comme sujet d'étude, trouve ses racines dans des textes antérieurs comme, par exemple, JAMES (1904a) dans lequel James refuse de considérer la

⁶ La majuscule est volontairement utilisée ici. Dans le reste de l'ouvrage, on utilisera le terme de "Conscience" pour désigner une entité et de "conscience" pour désigner ce qui rassemble les pensées conscientes.

Conscience⁶ comme une entité dotée d'une existence propre. S'est alors amorcé un débat qui perdure encore aujourd'hui entre subjectivistes, pour qui la Conscience est un existant qui ne se manifeste que privativement, et objectivistes, pour qui elle n'est qu'une fonction. Il n'est donc pas question, même dans le behaviorisme de Watson, de refuser le fait que les êtres humains aient des pensées mais plutôt de retirer ces pensées, non observables selon la méthode naturaliste, du champ scientifique.

**

Le passage d'une doctrine négative de la psychologie à une proposition positive se fait avec B. F. SKINNER (1938, 1953) qui reconstruit la notion de comportement comme "ce que fait un organisme". L'on peut par conséquent diviser le comportement humain entre ses composantes physiologiques et psychologiques, traçant du même coup une frontière étanche entre les deux, ce qui va engendrer la fameuse théorie des "boîtes noires" qui, à l'instar du cerveau, sont des objets scientifiques inaccessibles, dont seules les entrées et sorties peuvent être sérieusement étudiées.

On voit alors comment la notion de conditionnement opérant, telle que la définit Skinner, poursuit à la fois les travaux d'associationnistes comme THORNDIKE (1898) mais également de la physiologie à travers PAVLOV (1927) ce qui permet de construire un modèle général du conditionnement avant d'en faire une notion psychologique.

Ainsi, jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le behaviorisme fait figure de courant de pensée majoritaire dans l'étude du comportement humain et surtout dans l'ingénierie comportementale qui en découle. L'anthropologie sous-jacente à cette doctrine est de considérer l'humain comme un animal doté, non pas de propriétés particulières, mais, de certains comportements spécifiques⁷. Par conséquent, si l'on doit nommer le modèle anthropologique behavioriste le terme d'"homme-machine" serait relativement pertinent, dans la mesure où l'humain est, finalement, un animal possédant certains comportements particuliers⁸ découlant de phénomènes physiologiques sous-jacents, dont le langage articulé et la pensée, et que ces comportements peuvent être renforcés, positivement ou négativement. Ainsi, toute physiologie est substrat du comportement

⁷ notamment le langage que B. F. SKINNER (1957) considère comme tel et sur lequel il fonde une théorie de l'esprit

⁸ Au même titre que d'autres espèces ont des comportements particuliers.

et tout, même dans la sociologie, peut être dérivé de bases comportementales. Comprendre l'homme-machine dans ce contexte revient donc à comprendre comment les comportements de deux objets différents peuvent être compatibles ou antagonistes.

*
**

Plus récemment, et, notamment depuis HAYES, BARNES-HOLMES et ROCHE (2001), la *Relational Frame Theory* revendique une poursuite post-skinnérienne dans cette étude du comportement motivé. On trouve dans BLACKLEDGE (2003) une introduction à cette théorie qui postule le statut linguistique et opératoire des relations conceptuelles binaires⁹, difficiles à décrire d'un point de vue comportemental. Ces relations sont intéressantes si l'on cherche à comprendre comment les individus peuvent utiliser et produire de la signification dans le langage, sans pour autant avoir besoin d'une transcendance de cette signification. Cette transcendance existe nécessairement lorsque l'on définit le signe comme un couple signifiant/signifié avec de SAUSSURE (1916) en cela que la signification d'un signe est une propriété interne de ce signe, déterminée de façon plus ou moins arbitraire par son émetteur. S'il est facile de décrire comment il est possible d'apprendre à reconnaître une classe d'objets par la généralisation à partir d'observations particulières, cette définition du signe devient vite problématique, lorsque l'on cherche à décrire l'apprentissage de concepts, notamment relationnels, ce qui fait figure d'argument historique en faveur de certaines formes d'innéisme structuraliste. Grâce à ces approches linguistiques, il est possible d'envisager et de modéliser ces concepts relationnels, en les considérant non pas comme des structures mais comme des processus.

⁹ Relations du type aRb par exemple
"A est plus grand que B"

Dès lors les implications en termes d'interaction homme-machine sont importantes. En effet, connaître une relation devient moins connaître la signification d'une proposition que de pouvoir apprendre le rapport entre deux objets, ce qui permet d'envisager les comportements analogiques à l'œuvre dans ces systèmes.

3.1.2 CYBERNÉTIQUE ET COGNITIVISME : RETOUR AU RATIONALISME

Les besoins militaires de la Seconde Guerre Mondiale ont eut tôt fait de mettre à l'épreuve les théories du comportement humain. L'une des problématiques principales à ce sujet était la prédiction du comportement des pilotes ennemis en situation de combat, afin d'optimiser les systèmes de visée des armements anti-aériens. Si le behaviorisme permet d'envisager et de modéliser l'ensemble des comportements qui font le pilotage d'un avion, il se révèle incapable de produire certains modèles prédictifs de celui-ci, en particulier celui de l'anticipation des trajectoires.

Comme le note bien GALISON (1994), ces problèmes ont vite intéressé les mathématiciens. Wiener, en premier lieu, développa la méthode de filtrage, qui porte son nom¹⁰. Ce qui est considéré comme comportement ici est, en fait, la trajectoire d'un aéronef, dans lequel le pilote est assimilé à un servomoteur. Dès lors, la théorie se valide par la pratique et, puisque les travaux de Wiener permettent de prédire un comportement, cette réduction de l'humain à un dispositif de contrôle gagne un crédit substantiel.

Dans une lettre à Haldane en 1942, répertoriée par GALISON (1994), la position de Wiener vis à vis du behaviorisme se manifeste clairement comme une critique de la théorie des boîtes noires. Par conséquent, on peut considérer la cybernétique comme une tentative de dépassement du behaviorisme "par l'extérieur", à travers l'adoption des mathématiques, et, spécifiquement, de la théorie de l'information. L'on peut ainsi considérer le système nerveux comme équivalent à un servomoteur de l'organisme.

Chose intéressante, le développement du behaviorisme a essentiellement été le fait de chercheurs universitaires dans le domaine de la psychologie et/ou de la médecine. Avec l'émergence de la cybernétique, une tout autre approche émerge, celle d'une science d'ingénieurs. Ce mouvement est significatif si l'on prend en compte le contexte historique ; la science universitaire cherche à déterminer quels principes régissent les phénomènes observés alors que la science de guerre doit répondre à des problèmes particuliers de façon urgente. La généralité des solutions adoptées n'est alors établie qu'a posteriori, et n'est pas nécessairement recherchée, ce qui rend la science de guerre similaire à un prototype au sens simondonien du terme¹¹ c'est à dire un assemblage de systèmes

¹⁰ (WIENER, 1949)

¹¹ (SIMONDON, 1958)

techniques, connus et disponibles, dont l'on ne peut encore prévoir le comportement de façon précise.

On voit bien sous cet angle comment a pu se construire le groupe nommé Teleological Society en juin 1945 autour de Wiener lui même, Julian Bigelow (électronique), Arturo Rosenblueth (cardiologie), von Neumann (Informatique), Warren McCulloch (Physiologie) et Walter Pitts (Logique). Ce groupe de recherche s'est donné spécifiquement comme objet d'étude les systèmes dotés d'un but¹², tels qu'ils sont définis dans ROSENBLUETH, WIENER et BIGELOW (1943).

¹² *Purpose* en anglais.

La cybernétique ne peut donc pas être considérée comme une doctrine scientifique de la même manière que l'est le behaviorisme. En effet, si ce dernier pose des restrictions radicales à propos de ce qu'il observe, la notion de "système doté d'un but" est, dans la vision cybernétique, une définition très large, à tel point que l'on peut y voir une définition universelle, auquel cas l'on se retrouve plus proche de la philosophie que des sciences telles qu'on les définit habituellement. La vision de l'homme portée par ce mode de pensée est complexe à appréhender mais repose sur la dualité entre un corps physiologique et un système nerveux considéré comme un transducteur logique¹³ ayant pour base première un modèle électronique et non pas informatique.

¹³ De l'avis même de Wiener dans WIENER (1948).

L'humain-machine est alors réellement ici un humain-machine, en ce sens que tout est sensé être descriptible en termes d'automatique et que tout phénomène doit être compris en terme d'information et de contrôle de cette information dans un système complexe.

*
**

Il est intéressant par ailleurs de noter que la notion de complexité ne figure pas chez SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHILOSOPHIE (1926) et que la définition formulée par l'Académie n'est que très absconse¹⁴. Dès lors, il paraît trivial de souligner trop avant le caractère véritablement contemporain de cette notion, aujourd'hui couramment usitée.

¹⁴ "Caractère de ce qui est complexe, fait d'être complexe (souvent par rapport à un objet de même nature qui l'est moins)." dans ACADÉMIE FRANÇAISE (1935)

On se trouve ici confrontés à un problème bien différent de ceux que nous avons soulevés jusqu'alors ; que signifie la notion de complexité, d'où vient elle, et, à quoi sert elle, en tant que constituant caractéristique

de la pensée contemporaine ? Encore plus fondamentalement, il faut se demander si elle est véritablement utile.

La complexité est donc, en Français comme en Anglais, l'apanage de ce qui n'est pas simple. Dès lors, ce qui est complexe est en fait essentiellement compliqué. La non simplicité peut apparaître à nos yeux de deux manières, soit elle est partie intégrante de la quiddité de la chose considérée, soit elle ne représente qu'un échec de notre science à la comprendre ou la représenter.

Si l'on considère la complication comme une caractéristique fondamentale de certaines choses, il faut alors se placer d'un point de vue systémique, dans la mesure où l'on considère ces choses comme étant composées de choses différentes en interaction. Si l'on considère que le complexe est l'incompréhensible scientifique, il faut soit y voir le motif d'un changement de paradigme soit un problème à résoudre selon que l'on est ou non positiviste.

Selon une partie de la systémologie française et notamment dans ATLAN (1979) ou LE MOIGNE et MORIN (2001), la complexité est directement liée à la quantité d'information disponible sur un système. Dès lors elle représente la quantité d'information nécessaire à la description de ce système. On retombe alors sur la notion de la complexité qui est utilisée en informatique.

*
**

Pour un informaticien, parler de complexité en temps ou en espace revient à parler du nombre d'étapes ou de la quantité de mémoire nécessaire à la réalisation d'un algorithme. Cette notion permet, entre autres, de comparer différents algorithmes décrivant une même opération. Ainsi, en informatique théorique, la complexité n'est pas un caractère de l'opération décrite, c'est une propriété de la manière de la décrire. Parler de complexité en information revient donc à une complexité en espace.

La complexité informationnelle, inhérente aux systèmes biologiques, pose donc un problème énorme. Elle est soit une propriété des théories de la biologie, soit une propriété des systèmes eux mêmes. Or la manière de parler de systèmes complexes que l'on trouve chez ATLAN (1979) exclut la première possibilité.

Si c'est le système biologique qui est complexe, c'est qu'il adopte une évolution réellement algorithmique et non pas qu'il est seulement algorithmiquement descriptible. Or, pour adopter une évolution réellement algorithmique, il est nécessaire que l'on dispose d'un support pour cet algorithme, c'est à dire d'un module de pilotage ou à défaut d'un programme qui va régir toute l'évolution du système, de façon déterministe. Ce genre de système nous est bien connu, dans la mesure où il représente les objets techniques classiques.

Cette conception, proprement cybernétique, des systèmes biologiques nécessite donc que le génome, en tant que code, fasse office de programme de construction et de pilotage. La problème majeur de la biologie systémologique se réduit alors à la question suivante : peut-on coder l'ensemble de l'algorithme d'exploitation d'un système biologique, de manière déterministe, dans le génome ? Si la réponse est oui, tout va bien. Si la réponse est non, il faut alors considérer que la conception d'inspiration informatique, qui sous-tend cette théorie, n'est pas recevable et que les systèmes biologiques n'ont pas une évolution réellement algorithmique.

*

**

L'ÉMERGENCE du cognitivisme constitue une bonne preuve, s'il en fallait encore une, de la progression non linéaire de la science. On peut considérer l'acte fondateur de ce paradigme comme étant l'attaque frontale de CHOMSKY (1959) sur la théorie de B. F. SKINNER (1957). Cette critique se fonde sur la conception propre que Chomsky dérive de ses modèles de grammaire et, notamment, de l'idée selon laquelle il est impossible de construire une grammaire de l'anglais par des processus markoviens finis¹⁵. Cela impose l'existence de structures plus complexes et accrédite la thèse des grammaires génératives et transformationnelles.

¹⁵ (CHOMSKY, 1956)

Ce qu'on appelle "grammaire générative transformationnelle" est un ensemble de règles permettant de construire et contraindre des énoncés compréhensibles dans une langue donnée. Ainsi le langage est essentiellement la *performance* d'une *compétence*¹⁶ c'est à dire l'utilisation d'un ensemble d'objets assimilables aux catégories kantienne¹⁷.

¹⁶ Termes Chomskiens.

¹⁷ Voir p3.1.

Cette idée trouve un écho chez certains chercheurs au MIT, au premier rang desquels se trouve Jerry Fodor, qui est un fervent défenseur d'une

approche représentationnaliste de l'esprit, que l'on peut résumer comme le dépassement de la thèse automatique de la cybernétique par une thèse informatique. Le système nerveux n'est alors plus un servomécanisme dont le comportement est la pensée mais est la dimension *hardware* d'un système de traitement symbolique de l'information qui est une machine de Turing¹⁸ et, ainsi, comme le résume PUTNAM (1980), « Nous pourrions être faits de fromage suisse, que cela ne ferait aucune différence ».

¹⁸ Cf. TURING (1936).

Il est alors possible d'envisager et de comprendre l'esprit humain comme un ensemble d'algorithmes, traitant symboliquement les données sensorielles et les représentations qu'ils produisent de façon modulaire, chacun d'entre eux renvoyant à une faculté intellectuelle, comme la raison ou l'entendement. Ainsi, on trouve chez PYLYSHYN (1984) un critère dit d'"impénétrabilité cognitive", permettant de discriminer entre certaines fonctions, logicielles ou matérielles, de la cognition humaine, sur la base de leur capacité à être influencées par la pensée du sujet. Cela permet alors de construire et de supporter la thèse de MINSKY (1988) sur la "Société de l'esprit", selon laquelle la pensée peut être construite à partir des interactions entre agents non-pensants, ce qui constitue une réfutation de l'argument anti-représentationnaliste de SEARLE (1990) selon lequel cette position conduit à faire de l'esprit une série infinie d'homoncules, interprétant la représentation d'autres homoncules.

Ainsi, dès les années 1980, le cognitivisme computationnaliste s'est érigé comme école de pensée dominante, grâce à ses proximités immédiates avec l'informatique appliquée, pour laquelle une vision de l'humain-machine comme homme-robot s'avère fort commode. Le robot et l'ordinateur sont alors non plus perçus comme de simples outils de traitement de données mais comme de véritables paradigmes de l'humain et du cerveau ce qui est sous-tendu par l'idée que, plus l'on comprend ces modèles réduits de l'humain plus l'on comprend celui-ci.

*
**

DAUCUNS considèrent l'être humain comme un être essentiellement sapient, c'est à dire doué de la raison. Traditionnellement, la raison se caractérise par la capacité de choisir entre deux membres d'une alternative¹⁹ et la capacité à les distinguer. C'est sur cette base que l'on a distingué l'humain de l'animal dans la mesure où seul le premier est

¹⁹ Bien/Mal, Beau/Laid, Vrai/Faux...

capable d'agir moralement²⁰ alors le second demeure toujours guidé par une sorte d'ataraxie²¹.

Dès lors, être raisonnable, c'est pouvoir choisir en connaissance de cause et ne pas réagir de manière exclusivement passive aux vicissitudes de son environnement. Ce qui nous intéresse à travers la notion de raison, c'est son implication dans la connaissance. En effet, par sa capacité à discerner et à choisir, l'être humain peut connaître et, dans la tradition, c'est réellement cela qui lui fait dépasser sa condition animale. Une des dernières grandes évolutions en matière de gnoséologie²² se trouve dans l'œuvre de Kant. Les *Critiques* kantienne ont une portée civilisationnelle incommensurable, dans la mesure où elles ont été et demeurent aujourd'hui centrales dans notre manière de concevoir la connaissance humaine, elle sont incontournables que l'on soit en plein accord avec elles ou que l'on s'inscrive en faux.

Dans KANT (1787), Kant détermine deux types de connaissance :

1. Les connaissances *a priori* qui sont strictement indépendantes de l'expérience.
2. Les connaissances *a posteriori* qui sont dites empiriques, c'est à dire issues de la sensibilité.

De plus il distingue deux types de jugements (propositions) :

1. Les jugements analytiques qui attribuent à un objet un prédicat qui appartient à son concept.
2. Les jugements synthétiques qui attribuent à un objet un prédicat qui n'appartient à son concept.

Par composition on obtient donc :

Analytique <i>a priori</i>	Analytique <i>a posteriori</i>
Synthétique <i>a priori</i>	Synthétique <i>a posteriori</i>

Les jugements analytiques *a priori* et synthétiques *a posteriori* ne posent pas de problèmes particulier. Le premier correspond à un jugement abstrait alors que le second correspond à un jugement issu de la sensation.

Les catégories²³ sont les concepts essentiels de la pensée qui per-

²⁰ C'est à dire de reconnaître le bien et de le poursuivre à travers ses actions.

²¹ Du grec *ἀταραξία* que l'on peut traduire par *tranquillité* et qui constitue de manière générale une absence de peine.

²² La discipline qui étudie les différents aspects de la connaissance.

²³ Kant reprend le terme à Aristote chez qui les catégories sont les manières de désigner ce qui est.

mettent de concevoir les objets, en tant qu'objets, et sont donc des notions a priori.

Distinguer cela permet de poser un problème fondamental qui est celui de l'antériorité ontologique de la logique sur la pensée. Chez les grecs, il existe une certaine transparence de la langue, qui permet d'affirmer que le langage exprime la pensée sans déformation et, analyser le langage, revient à analyser la pensée. C'est ainsi que les grecs utilisent principalement la notion de logos²⁴ pour définir la dimension "logique" de la pensée²⁵.

²⁴ Parole

²⁵ νοῦς

*

**

DEPUIS la pensée latine, la notion préférentiellement utilisée pour parler de cette dimension "logique" de la pensée est celle de ratio²⁶. Alors, l'exemple Kantien montre que l'étude de la pensée nécessite d'éclaircir une possible ambiguïté ontologique ; soit les structures de la pensée sont rationnelles, et on sera alors dans un cadre classique, soit elles ne le sont pas, et la logique n'est qu'une reconstruction et une rationalisation.

²⁶ Calcul.

Considérer que le langage découle de la logique impose de considérer l'existence de structures de base qui sont préexistantes à son acquisition. Ce point de vue peut prendre deux formes ; soit il existe une faculté logique de l'esprit²⁷, en tant qu'entité immatérielle, soit le système nerveux est un transducteur logique²⁸.

²⁷ L'entendement

²⁸ Objet convertissant une énergie quelconque en logique.

On retrouve alors les fonctions classiques du langage, qui sont axées autour de la capacité de communication de l'humain, dans une conception rationnelle du langage. Cette vision du langage, comme émanation de la raison, permet un chevauchement des domaines ; si le système nerveux est un transducteur logique, alors la psychologie devient une composante à part entière des neurosciences et se base sur la logique comme ces dernières. Cette vision correspond au paradigme cognitiviste qui fusionne en fait conscience et cognition et doit donc être considéré comme un rationalisme²⁹.

²⁹ Doctrine d'après laquelle la raison, en tant que système de principes organisateurs des données empiriques, fonde la possibilité de l'expérience. cf Lalande

Il faut alors distinguer deux tendances historiques dans le rationalisme qui sont le nativisme et le structuralisme. Le nativisme au sens fort du terme n'a plus guère cours que chez les tenants de la philosophie chrétienne et il dérive directement de la théorie Platonicienne

TAB. 3.1 : Catégories de la pensée chez KANT (1787)

Quantité	Qualité	Relation	Modalité
Unité	Réalité	Inhérence et substance	Possibilité - impossibilité
Pluralité	Négation	Causalité et dépendance	Existence - non-existence
Totalité	Limitation	Communauté	Nécessité - contingence

de la réminiscence³⁰, selon laquelle les âmes immortelles des hommes contemplent les Idées³¹ entre deux incarnations. Lors de l'incarnation, les âmes vont oublier ce qu'elles connaissent et le rôle de la méthode dialectique va être de remettre au jour ces connaissances.

³⁰ (PLATON, p. d.-d)

³¹ εἶδος

Cette vision de la pensée comme un donné disponible de l'individu va perdurer longtemps et se retrouve même chez DESCARTES (1641) au travers des idées *claires et distinctes* qui sont, elles aussi, disponibles à la naissance. La question de l'antériorité du langage sur la pensée est alors parfaitement tranchée par le statut ontologique de cette dernière. En ce qui concerne le problème de la dimension subjective de la connaissance individuelle, la question ne se pose pas, dans la mesure où, chez Platon, les Idées sont communes à toutes les âmes qui sont perceptuellement infaillibles et, chez Descartes, l'occasionalisme³² prévaut.

³² Doctrine selon laquelle Dieu crée le monde à chaque instant. N'étant pas trompeur il ajuste les rapports de l'âme et du corps dans cette création ce qui lui permet de fournir à tous les mêmes idées claires et distinctes.

Le "structuralisme" rationaliste est en fait une reprise du thème nativiste au XVIII^e siècle, à travers la pensée kantienne. L'idée principale de cette vision de l'humain tient au refus de considérer que l'individu naît avec des connaissances et à l'affirmation qu'il naît avec les capacités de fabriquer ses connaissances. C'est le rôle fondamental des *catégories* dans KANT (1787) et qui se listent selon le tableau ??

Le paradigme kantien veut qu'il soit impossible de penser en dehors de cet ensemble de concepts et, en cela, les catégories constituent la structure, au sens fort, de la raison humaine, de façon innée, ce qui constitue la synthèse kantienne entre empirisme et rationalisme : toute connaissance humaine provient de la sensation mais ne peut se faire sans la raison.

*
**

On voit alors comme il est possible de tracer un parallélisme entre les différents paradigmes cognitivistes et les doctrines rationalistes antérieures, ce qui comme on le verra plus tard pose un certain nombre de problèmes majeurs, dont l'anthropocentrisme.

Le principal problème de l'anthropocentrisme tient au fait qu'il réactive perpétuellement la notion d'exception humaine. On peut voir l'exception humaine comme une mise à part de l'homme des sciences de la nature, cette extraction étant la conséquence de la bifurcation dont parle WHITEHEAD (1920). La bifurcation whiteheadienne est un concept qui marque une position radicale vis à vis des sciences, à partir du XVIII^{ème} siècle, et qui constate un élargissement du dualisme cartésien à l'ensemble de la Nature, en lui substituant deux systèmes de réalité distincts, l'un pour la connaissance rationnelle et l'autre pour la connaissance sensible.

Dès lors, l'humain devient un cas particulier de la nature et cesse d'en être une partie. Cela cause principalement des problèmes dans l'étude de la cognition, qui n'est pas une science de la nature mais une proto-philosophie de l'esprit si elle ne tient pas compte des similarités existantes entre les structures qui constituent l'homme et celle qui constituent le reste du règne animal.

La seconde conséquence de l'anthropocentrisme est la projection de finalité dans l'évolution de la nature. Il devient, en effet, commun de considérer que l'homme, en tant qu'il est à part, dispose d'une place privilégiée dans l'ordre naturel et, par extension, dans l'ordre évolutionnaire. Dès lors, l'humain devient le prototype du naturel, et plutôt que de rechercher ce qui fait l'unité de la nature on cherche alors à comprendre le non humain en tant qu'il est non humain.

L'humain est un système vivant, il est produit par un ensemble de phénomènes régis par une causalité événementielle.

Deux principales conceptions de l'humanité, appelées anthropologies, peuvent être distinguées. La première, dite cognitivisme, considère la conscience comme un traitement de l'information sur le modèle de la machine de Turing. La seconde considère la conscience comme le résultat d'une activité non linéaire du couplage entre l'organisme et son milieu.

L'humain se caractérise par un comportement linguistique complexe et abstrait. Cette capacité linguistique permet l'interaction sémiotique avec les éléments de son environnement qui n'est pas le décodage d'une signification extérieure mais la production de signification nouvelle.

La rationalité n'est pas une propriété de l'intellect humain mais une production sociotechnique liée à une utilisation particulière du langage.

3.1.3 PROPOSITION D'UNE ALTERNATIVE

L'**INTÉGRATION**, comme mode de pensée des relations entre la physique, la chimie, la biologie et le comportement, pose le problème du changement de paradigme³³ qu'elle génère. En effet, le fait qu'elle permette de mettre en œuvre une théorie prédictive, sur plusieurs niveaux, impose le passage de l'anthropologie³⁴ à l'anthroponomie³⁵.

La première question que pose ce passage du λόγος au νόμος est son opportunité. Les conclusions de notre travail³⁶ incitent, toutefois, à penser que les conditions d'un changement de paradigme sont, au moins, partiellement réunies, dans la mesure où les bases d'un paradigme intégratif sont déjà décelables au sein des populations médicales et ingénieriales.

La conception des complexes humain(s)-machine(s) ne passe pas nécessairement par une vision intégrative des problèmes que ces systèmes posent. Toutefois, les approches actuellement classiques tendent à scinder les objets qu'elles conçoivent en fonction de leurs disciplines de départ. C'est en cela qu'elles demeurent dans l'anthropologie car elles ne sont unifiables que de l'extérieur, à travers un discours fortement cloisonné par la spécialisation.

³³ Au sens que KUHN (1962) donne à ce terme

³⁴ ἄνθρωπος + λόγος : Discours rationnel sur l'humain

³⁵ ἄνθρωπος + νόμος : Connaissance des lois qui régissent l'humain.

³⁶ (NAZIN & FASS, 2015)

³⁷ "schème causal" : traduit de "scheme" en anglais. La notion de schème causal correspond au champ d'application d'un ensemble théorique donné (par exemple la physique, la biologie, etc ...).

³⁸ Par exemple à travers une modification des conditions d'apparition d'un phénomène chimique par un phénomène physique.

Le passage au νόμος marque une unification de l'intérieur de ces disciplines, qui est permise par l'intégration. La démarche intégrative permet de mettre en regard différents domaines causaux³⁷ et leurs relations. La pluridisciplinarité, nécessaire à la compréhension des complexes homme-machine, repose sur cette idée que des schèmes causaux de nature différentes s'influencent de manière réciproque et complexe, non pas parce qu'ils sont, proprement, en interaction mais parce que certains phénomènes, qui leur sont propres, ont une incidence sur des phénomènes de nature différente³⁸.

C'est l'existence de ces schèmes causaux, et leurs incidences conjointes, qui génèrent la complexité inhérente au vivant. C'est donc à travers l'étude de ces incidences que la biologie doit chercher à le comprendre. De la même manière, c'est sur la base d'une intégration de la biologie que les sciences de l'homme doivent chercher à construire leurs modèles.

Le principal problème soulevé par cela est celui de la réduction et du réductionnisme. Poser qu'un schème causal a une incidence sur un autre ne revient pas à poser qu'il est possible de réduire la nature du conséquent à celle de l'antécédent. Au contraire, ils sont distincts en nature mais se composent dans le phénomène, c'est en cela qu'ils sont intégrés.

Le fonctionnement correct de la science, en tant qu'ensemble de lois permettant de décrire et de prédire le cours des événements de l'environnement de l'homme, nécessite de supposer que les conditions de cet environnement sont stables dans une fenêtre de temps relativement longue.

Les grecs posaient comme principe fondateur de leur science la fixité de leur cosmogonie, pour garantir la validité de leurs analyses dans la sphère de la corruptibilité. Chez Descartes, la doctrine de la création des vérités éternelles pose Dieu en tant que cause des vérités logiques comme ce principe de stabilité³⁹. Chez Leibniz, la relation de Dieu aux vérités éternelles n'est pas une relation créateur/créé, dans la mesure où il est soumis à la logique. Quoi qu'il en soit, chez ces auteurs, l'humain est plongé dans un environnement dans lequel les vérités logiques et légales de la nature lui sont pré-existantes.

³⁹ Comme il est parfait il ne change pas d'avis donc les vérités éternelles ne sont pas susceptibles de changer

ENFIN, on parvient après une analyse bibliographique, à établir une classification des différentes anthropologies scientifiques en présence aujourd'hui qui est récapitulée dans le tableau 3.2 (page 106). Au grands courants historiques, nous avons ajouté ce que nous avons appelé *intégrativisme* qui correspond aux définitions que nous considérons comme cohérentes avec la définition de l'humain que nous soutenons dans ce travail.

3.2 LA MACHINE

3.2.1 HISTOIRE SUCCINCTE DE LA MACHINITÉ

ARISTOTE (p. d.-c) est l'auteur d'une maxime fort connue et qui pose que "la nature imite l'art". On approche alors la définition de l'être de la machine à travers son artificialité et donc, par là même, à travers son statut de création humaine. Le terme même d'artifice est une création du XIX^{ème} siècle et recouvrait originellement l'acte productif lui même. L'artifice est donc, à la fois, l'objet et l'art consommé de sa fabrication, dans une sémantique de l'ingéniosité.

Le problème est de percevoir comment les notions d'artefact et de machine se recoupent. En effet, il paraît trivial que la machine est artefact, mais, certains artefacts ne sont pas des machines⁴⁰ et, dès lors qu'il y a distinction, il faut qu'il y ait critère. Le grec μηχανή⁴¹ désigne les assemblages mécaniques, comme les machines de guerre ou les instruments de levage. Est contenue dans cette notion l'idée d'ingéniosité permettant à l'humain de réaliser des actions autrement impossibles.

⁴⁰ L'exemple grec traditionnel du lit est un artefact mais pas une machine.

⁴¹ Qui va fournir le latin *machina* et, par là même, la notion excessivement polysémique et moderne de machine que l'on a coutume d'utiliser de nos jours.

Dès lors, on voit bien ce qu'est une machine, à savoir un artefact ou un assemblage d'artefacts ayant une fonction ustensilaire, si l'on en suit le pseudo-Aristote des *Mécaniques*, qui aura une influence certaine sur les intellectuels de la Renaissance⁴². Au delà de cette réflexion primitive sur l'artefact, l'ingénierie va réellement naître quelques temps plus tard à Alexandrie, notamment avec Archimède, qui va concevoir les premières véritables machines complexes. Ainsi, son invention du palan nécessite de comprendre les rapports entre les différents phénomènes, liés à l'usage conjoint de plusieurs poulies, et comment ils permettent de diminuer la force requise pour soulever une masse donnée. On doit à Philon de Byzance et à Héron d'Alexandrie (I^{er} siècle) un développement important

⁴² À ce sujet voir de GANDT (1986)

TAB. 3.2 : Grille comparative des différentes anthropologies scientifiques du XX^{ème} siècle.

		Behaviorisme	Cognitivisme	Connexionisme	Cybernétique	Intégrativisme
Individu	Corps	Organes sensoriels + Organes effecteurs + Système nerveux WATSON (1925)	Ordinateur biologique + Organes sensoriels PRIVSYHN (1984)	Réseau de neurones + Corps MCCULLOCH et PTTIS (1943)	Systèmes régulés par des boucles de rétroaction WIENER (1948)	Systèmes métastables autoassociés CHAUVET (2006)
	Esprit	Langage subvocal articulé + Mémoire WATSON (1925)	Traitement symbolique, spécialisé et centralisé de l'information + Mémoire FODOR (1975)	Ensemble de motifs d'activation émergents dans le réseau non centralisé ROMERHART et McCLELLAND (1986)	Traitement décentralisé de l'information + Mémoire	Pensée (au sens Jamesien)EDERLMAN (1992)
	Architecture	Mécanique WATSON (1925)	Modules indépendants gérés par une unité centrale FODOR (1983)	Architecture du réseau	Réseau de boucles de régulation WIENER (1948)	Biologique
Comportement	Constitution	Conditionnement B. SKINNER (1976)	/	Renforcement	/	Auto Association Stabilisatrice CHAUVET (1993a)
	Élément	Sous-unité spatiale	Module FODOR (1975)	Partie connexe du réseau McCULLOCH et PTTIS (1943)	Boucle de régulation WIENER (1948)	Sous-unité fonctionnelle
	Cognition	Réaction articulée à un stimulus extérieur WATSON (1925)	Résolution de problème	/	Retour à l'équilibre ROSENBLUTH, WIENER et BIGELOW (1943)	Catégorisation par réentrées thalamo-corticalesEDERLMAN (2004)
Évolution	Perception	Réaction articulée à un stimulus extérieur WATSON (1925)	Manipulation de symboles à partir de règles pour résoudre un problème extérieur	Activation d'un motif adéquat à la résolution d'un problème extérieur McCULLOCH et PTTIS (1943)	/	Intégration de données sensiblesGIBSON (1979)
	Action	Prise de connaissance d'un stimulus extérieur WATSON (1925)	Acquisition d'information MARR (1982)	Acquisition d'information	Perturbation par l'environnement RUYER (1954)	Interactions des sous-systèmes
	Interaction	Processus mécanistes WATSON (1925)	Séquences algorithmiques	Séquences d'activation	Recherche d'équilibre ROSENBLUTH, WIENER et BIGELOW (1943) RUYER (1954)	Couplage transductif CHAUVET (1993c)CHAUVET (1993b)
Fonction	Mémoire	Faculté de l'esprit WATSON (1925)	Faculté de l'esprit	Schémas d'activation	/	Recatégorisation EDERLMAN (1992)
	Fonction	Pas de fonction WATSON (1925)	Liée à un module PUTNAM (1992)	/	Régulation RUYER (1954)WIENER (1948)	Résultante de l'activité d'un système
	Communication	Inter-individuelle WATSON (1925)	Théorie de l'information	Signal physio-chimique	Théorie de l'information WIENER (1948) RUYER (1954)	Interaction fonctionnelle CHAUVET (2006)
Environnement		Source de stimulus WATSON (1925)	Source d'information et de problèmes	Source d'information et de problèmes	Source de perturbation	Hypersystème

des machines, aussi bien dans le domaine militaire que civil, qui passe par la mathématisation des phénomènes impliqués, afin d'en tirer un effet prévisible quantitatif et non plus uniquement qualitatif.

Le même Héron d'Alexandrie va développer une typologie des *machine simples* : Levier, roue, poulie, coin, plan incliné, vis, engrenage, treuil.

Cette typologie doit être conçue comme un alphabet des formes techniques de base qui permettent de construire des éléments plus complexes. On se trouve donc ici en présence de tous les éléments qui permettent de construire, de façon certaine et planifiée, une grande variété de systèmes de levage ou de transmission. Dès lors on voit bien ce que devient une machine à ce moment de l'histoire ; c'est un assemblage mécanique de formes techniques destiné à déplacer un objet. Avec cette conception, peu importe que ce qui meut la machine soit une vapeur d'eau, un animal ou la main humaine.

Il n'est pas anodin de considérer le fait que cette ingénierie prit naissance à Alexandrie. À cette époque, la ville se trouvait dotée d'infrastructures intellectuelles de premier plan⁴³ tout en étant une citée construite quasi *ex nihilo* pour servir de capitale à la dynastie Lagide. Conjointement à cette école des mécaniciens d'Alexandrie, va se développer l'école néoplatonicienne et l'alchimie alexandrines. Cette proximité mérite d'être notée, car elle dépasse le caractère historique d'une coexistence, dans la mesure où cette alchimie va se développer fortement au moyen-âge, et repose sur les mêmes deux principes épistémiques que la mécanique, à savoir l'analyse et la synthèse.

⁴³ le Musée et la Grande Bibliothèque.

Comme le montrent BERTHELOT (1885) puis SIMONDON (1970), la connaissance analytique des alchimistes repose sur la mise en évidences de primitives dans l'ordre des phénomènes, et, c'est en connaissant ces primitives, sortes de machines de base, qu'il est possible de manipuler la Nature et de dépasser les limites de ce qui existe en acte. Ainsi, de cette connaissance de la nature, va émerger un objectif double pour les alchimistes ; la synthèse de l'or⁴⁴ et la fabrication de l'homoncule⁴⁵. Il y a alors une mutation du rapport des penseurs à la technique, dans l'alchimie médiévale, dans la mesure où celle-ci va intégrer les machines à la Nature et, par conséquent, la technique n'est plus une ruse mais l'usage de phénomènes connus mais non évidents.

⁴⁴ Non pas dans un but économique mais parce que l'or est alors considéré comme le plus haut métal dans la hiérarchie, celui qui synthétise l'or sera alors celui qui aura exhibé les capacités d'agir sur tous les métaux.

⁴⁵ Fabrication purement artificielle d'un individu vivant sans se reposer sur la gestation intra-utérine.

Ainsi, si ces pratiques semblent, à nos yeux modernes, mystiques et magiques, il faut garder à l'esprit ce qu'a permis l'hermétisme durant le moyen-âge, à savoir l'élaboration et la transmission de protocoles codifiés dont le respect est condition *sine qua none* du résultat final, ce qui aboutit à la culture de laboratoire que l'on connaît aujourd'hui en chimie.

Jusque très tard, la notion même de machine est flottante mais possède un noyau relativement constant : une machine est une construction, faite de parties plus simples, dont la fonction est de convertir une énergie quelconque en énergie mécanique. Il convient donc à ce stade de distinguer très fortement deux notions qui sont celles d'outil et celle de machine.

3.2.2 SIMONDON ET L'INDIVIDU TECHNIQUE

L'ABORD de Gilbert Simondon est problématique à plusieurs titres. La nature de son œuvre, en tant qu'objet éditorial, pose problème dans la mesure où les textes majeurs de sa pensée ont été rendus disponibles de manière asynchrone, et, que les cours et publications en permettant l'exégèse ne sont disponibles que depuis récemment comme le rappelle BARTHÉLÉMY (2014).

Cela a concouru à ce qu'il existe deux écoles concernant la portée et le sens de la philosophie simondonienne. La première poursuit directement la publication de SIMONDON (1958) et considère Simondon comme *penseur de la technique*. SIMONDON (1958) propose alors un ouvrage, difficile et abouti, concernant l'essence de la technique, dans une opposition aux idéologies de l'époque comme le marxisme ou plus encore l'heideggerisme. De façon plus récente, une approche plus complète de sa philosophie et en particulier de sa théorie ontologique s'est développée.

Loin de s'opposer, ces deux visions de Simondon visent tout de même des objectifs différents et qui tiennent à l'idée qu'un auteur se fait de ce qu'est la philosophie comme pratique entre pensée spécialisée et interrogation encyclopédique. Le caractère aujourd'hui matériellement disponible de la bibliographie simondonienne et l'évidente relation de dépendance épistémologique entre la thèse complémentaire de 1958⁴⁶ et la thèse principale de 1964⁴⁷ nous poussent ici à adopter un point de vue

⁴⁶ SIMONDON (1958)

⁴⁷ SIMONDON (1964)

global sur les travaux de Simondon, considérant que la technique est le point nodal de son anthropologie mais aussi de l'ensemble de sa pensée.

Suivre ce plan de lecture "selon l'ordre des idées" impose de saisir pleinement le point de départ de la pensée simondonienne, qui n'est pas la technique mais qui est le concept d'individu. SIMONDON (1964) commence alors par se saisir d'une constatation sur l'alternative historique de la philosophie, entre « [la] voie substantialiste, considérant l'être comme consistant en son unité, donné à lui-même, fondé sur lui-même, inengendré, résistant à ce qui n'est pas lui-même » ainsi que « [la] voie hylémorphique, considérant l'individu comme engendré par la rencontre d'une forme et d'une matière ».

Cette alternative est une aporie dans la mesure où le fait d'être, pour une chose, n'est pas indissociable de la genèse de cette chose, rien ne naissant complet à partir de rien. Dès lors, l'approche traditionnelle nécessite un principe originel de tout individu, ce principe ne pouvant être autre chose qu'un individu lui-même, peu importe qu'il soit d'un autre genre comme dans l'hylémorphisme. Pour dépasser cette aporie, Simondon va poser l'ontogénèse au centre de sa pensée, cela va le conduire à préférer les individuations aux individus, car tout ce qui nous apparaît comme tel n'est qu'un processus en cours. Cette approche refuse donc autant le substantialisme que l'émergence de la forme, d'un point de vue ontologique. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas de formes ou de genericité mais, plutôt, que celles-ci ne sont pas le principe ontogénétique des choses mais un moyen et une conséquence de l'existence.

Cela introduit une temporalité fondamentalement neuve en ontologie. Le schéma classique suppose de passer du néant à l'être, puis au devenir, alors que le schéma simondonien postule qu'être c'est toujours devenir, et réciproquement. Ainsi, il y a une proximité avec un certain empirisme et un certain pragmatisme dans cette ontologie, car l'être qui nous intéresse et inquiète n'est pas celui d'HEIDEGGER (1927) ou de Sartre⁴⁸ mais celui qui est dans le monde. Ainsi, l'ontologie n'est plus une recherche de la réponse à la question fondamentale du quelque chose contre le rien, mais, un questionnement sur l'être disponible, c'est à dire le monde environnant.

⁴⁸ L'Être avec une majuscule.

Cette pensée relative de l'être impose alors de profonds changements dans l'analyse. En effet, poser la mondanité comme nécessité impose de renoncer à l'abstraction ontologique primordiale de l'existentialisme.

Chez HEIDEGGER (1927), l'étant est l'Être qui se concrétise dans une temporalité extérieure à lui même, ce qui induit un schéma ontologique foncièrement discontinu. Or, poser l'ontologie comme la recherche sur l'étant disponible empêche cette discontinuité, puisque il devient impossible de penser la relation de l'Être au Néant de cette façon. L'approche est donc renversée, la question n'est plus de comprendre pourquoi, divers étants, distincts les uns des autres, peuvent coexister mais comment les individualités constitutives du monde se constituent en relation les uns avec les autres.

On tient alors là l'une des clés de la pensée de Simondon qui est le passage du *pourquoi* au *comment*, tant dans la métaphysique que dans la philosophie qui en découle. La question du pourquoi n'est que subsidiaire à cette recherche des modes de fonctionnement, qui régissent les individualités. Ainsi SIMONDON (1964) pose la nécessité de trouver l'antériorité de l'être, non pas dans le néant, mais dans l'être antérieur. L'individu va donc s'extraire de façon continue et temporelle. Il ne suffit pas de replacer la temporalité dans les choses pour pouvoir expliciter la façon dont elles s'émancipent de leur inexistence relative. L'émergence de l'individualité ne se fait pas dans le temps mais dans la durée, et le temps n'est qu'un paramètre qui permet de décrire certaines relations qui ont lieu sur un plan plus large que celui de l'individu. Ce plan plus large, Simondon l'appelle *nature préindividuelle* en reprenant à son compte la théorie présocratique de la substance unique. Ainsi, puisque toute individuation est *en cours*, s'ensuit nécessairement que s'individualiser, c'est se complexifier, par rapport à son état préindividuel, c'est grandir, pousser que cela soit pour une plante, un animal ou un cristal. Il y a dès lors une cosmogonie que l'on se doit de remarquer et qui se fonde, dès le départ, sur la nécessité d'une relativité d'échelle en ontologie, puisque tout individu peut être un composant de la préindividualité d'un autre.

Et dès lors, il y a là apparition d'un paradoxe puisque l'on doit convenir de l'adoption de deux notions, la substance unique et ce qui paraît être un atomisme rendu nécessaire par la relativité d'échelle. Simondon a pris acte des leçons de la physique contemporaine et notamment des travaux, déjà anciens en 1958, de la physique quantique. Ainsi, s'il y a atomisme chez lui, il faut prendre garde à l'excès de littéralité comme l'on va le voir avec la notion d'ἄπειρον. On peut se représenter la dimension processuelle de l'individualité en ayant à l'esprit une nuée d'oiseaux dans le ciel lointain.

Une nuée en vol n'est perceptible que parce que l'action des oiseaux qui la composent est coordonnée, non par une force extérieure, mais, par un comportement spécifique. Sitôt qu'ils se désolidarisent, tout ce qu'il reste à voir ce sont des oiseaux individuels. Ainsi, ce qui engendre l'individualité perceptible de la nuée n'est ni l'une de ses propriétés fondamentales ni l'une des oiseaux mais l'interaction entre ces derniers. L'on voit ainsi que, si la nuée est autre chose que le simple regroupement des oiseaux qui la constituent elle n'est toutefois rien de plus que cela. Il est alors aisé de considérer comment, d'un point de vue ontologique, deux niveaux d'échelle existent et comment tous deux sont chacun propice à certaines individualités. Dès lors, et c'est là d'une grande importance, c'est l'ensemble des relations internes à la nature préindividuelle qui va engendrer l'individualité et non pas les individus qu'elle contient. Ce qui ressemble ici à un atomisme n'en est en fait pas un, bien que des parallèles existent entre les deux.

Il peut paraître contradictoire de refuser le substantialisme en adoptant l'hypothèse d'une substance unique. Dans les faits, il n'en est rien. La substance que vise Simondon, c'est l'ἄπειρον⁴⁹ anaximandrien. ANAXIMANDRE DE MILET (1991), parfois considéré comme le premier philosophe de l'Histoire, fut le disciple de Thalès de Milet, dont la cosmogonie proposait aussi l'unicité de la substance. Pour Thalès, existe un ἀρχή⁵⁰ qui est l'eau. Toute substance seconde n'est alors qu'un dérivé de l'eau, la terre est de l'eau condensée et l'air de l'eau raréfiée. L'avancée d'Anaximandre par rapport à son maître est qu'il fait de cet ἀρχή un principe premier aux éléments que l'humain peut expérimenter. L'ἄπειρον est donc le principe de toute chose, parce qu'il est le principe de tous les principes, il est nécessaire car rien ne peut sortir de rien et le néant⁵¹ n'existe pas. Ce qu'il y a d'intéressant au sujet de l'ἄπειρον, c'est la manière dont ce concept affirme le mode d'existence du réel, considéré comme objectif tout en étant construit de façon foncièrement négative.

L'ἄπειρον, chez Anaximandre, est donc ce qui est illimité, inengendré et indéterminé dans le monde. Il est illimité dans le sens littéral de *limite*, car il n'y a pas d'en dehors du monde et qu'il est partout et en tous temps dans le monde. Il est inengendré car il est fondamental, c'est à dire qu'aucun principe ne permet d'expliquer son existence. Il représente donc, en termes aristotéliens, la première des causes efficientes. Enfin, pour la même raison, il est indéterminé, dans la mesure où c'est son devenir qui est

⁴⁹ *Apeiron*, terme formé par la négation de πέρας (limite) et littéralement "ce qui ne se termine pas".

⁵⁰ *Arché*, l'origine. Qui va donner le préfixe "arché-", notamment dans archétype : le premier type, au sens où il est primordial.

⁵¹ Il faut prendre garde à distinguer néant et vide dans l'histoire de la pensée humaine car le vide est absence d'être alors que le néant est impossibilité d'être.

le premier déterminant dans l'ordre des causes. Dès lors, par la négation de ce qui caractérise les étants, Anaximandre en vient à considérer l'ἄπειρον comme le matériau primaire de toute réalité.

C'est cette dimension de matière primaire qui intéresse Simondon dans le concept d'ἄπειρον pour son ontologie génétique. L'un des problèmes qu'a Simondon c'est que, si la philosophie substantialiste de l'époque ne permet pas de comprendre le monde, la physique ne permet pas de comprendre le monde vécu. L'ontologie doit se faire contre la substance d'une part, et, indépendamment de la science d'autre part. Dès lors ce qu'il cherche à expliquer, c'est non pas la réalité, qui est le domaine des sciences objectives, mais le réel, pris dans son sens étymologique latin de *realis*, c'est à dire ce qui a trait aux choses matérielles, à savoir l'univers comme environnement. Bien sûr, cette indépendance est elle aussi à prendre littéralement, car il n'est certainement pas question de deviser sans horizon ni fondement mais de considérer que la physique ne peut expliquer que la matérialité des choses et non pas leur devenir, en tant qu'individualités, qui doit être considérée de façon complémentaire, donc non contradictoire. En d'autres termes, lorsque nous regardons l'une des *compositions* de Mondrian, nous ne regardons pas des atomes. Mais, sans atomes, il ne saurait y avoir de peinture et, lorsque nous en parlons, nous ne parlons pas des atomes qui la composent mais de ce qu'ils permettent.

Il s'agit là de l'une des intuitions les plus puissantes de Simondon concernant la possibilité de la métaphysique à l'âge atomique, ce n'est pas l'Être qu'il faut prendre comme base de l'ontologie mais la matière. Toutefois, il faut considérer cette matière comme on considère l'Être c'est à dire comme une abstraction. Comme on l'a vu, l'une des phases importantes de la pensée occidentale a été la découverte de la possibilité de convertir de l'énergie depuis une forme vers une autre forme, ce qui a mis fin à la métaphysique des fluides, car si ceux ci sont interchangeables il ne peuvent plus être considérés comme distincts, mais représentent des modalités d'une abstraction primordiale qu'est l'énergie. Affirmer la convertibilité de la matière en énergie ne revient pas à faire complètement cela mais pose la matérialité comme abstraction.

Alors, être, c'est être matériel ou rien. En tout cas c'est être une matérialité, en cela qu'il n'y a rien qui n'ait un substrat matériel qui est ce qu'on appelle réalité et qui est chez SIMONDON (1964) "ce qui est

primitivement [...] capable de se manifester comme onde ou corpuscule". Et ce qui intéresse SIMONDON (1964) dans l'ἄπειρον c'est justement cette dimension incontournable d'un principe unique abstrait, dont les transformations sont à l'origine de toute chose. Ce principe, SIMONDON (1964) va le nommer *préindividuel*, se distinguant ainsi des présocratiques, et en faire le principe du monde. Le monde n'est ni un lieu ni un contenant mais une totalité. Cette totalité ne contient pas les choses mais les constitue dans l'espace ainsi que dans la durée.

Dès lors, si l'on pousse la métaphore, l'étant n'est pas *jeté dans le Monde* mais en est un précipité. Cette métaphore s'arrête avec la durée, en cela que la phase hétérogène qui émerge de l'indéterminé mondain n'est pas un processus borné dans le temps mais qui dispose de sa propre évolution dynamique dans la durée. L'individuation, qui procède par création de phases dans le réel, crée donc, de façon simultanée, un individu et son milieu associé. Ainsi, la réalité comme collection des étants, paradigme classique, ne tient plus et est remplacée par un indéterminé métastable. Il n'y a ni dedans ni dehors car ce qui n'est pas est indicible et tout ce qui est est en relation au préindividuel lui-même en relation avec le reste des étants.

Pour reprendre le terme déjà utilisé, il y a intégration de tout dans le monde, non pas au sens dérivé du terme où il s'agirait de faire fonctionner ensemble des réalités distinctes et isolées mais au sens où le monde est un tout, que l'analyse distingue en individus. Il faut donc un esprit pour qu'il y ait des objets. De la notion grecque, SIMONDON (1964) ne va conserver que l'indétermination et l'illimitation car, là où ANAXIMANDRE DE MILET (1991) cherche un principe élémentaire de la matière, lui a en vue un principe existentiel des choses.

Puisque l'on refuse de caractériser les étants de façon bornée et isolée, il faut bien tout de même savoir ce qu'est un étant de façon générique. Pour SIMONDON (1964), un étant est avant tout un événement c'est à dire un existant au sens littéral du terme. Cela tient à la dimension polyphasée de la réalité, puisque être individuellement c'est être en individuation, alors c'est advenir dans le même mouvement. Il faut ainsi ne plus se demander pourquoi il y a de la matière mais pourquoi il y a des choses. La réponse à cette question se trouve dans la définition de la réalité comme système métastable de matière. On l'a dit, il ne s'agit aucunement ici de réduire les

choses à la physique ou de nier cette dernière. La factualité de la matière est une évidence physique tout comme les interactions fondamentales et, par conséquent, le pourquoi des choses n'est pas là mais dans la complexité que la physique constate, c'est à dire dans l'organisation.

*
**

COMME l'on vient de le voir, être c'est avant tout être un événement du monde. Être un événement, c'est avoir un début, une fin et une durée propre, toutes trois liée aux relations de l'étant et du reste du monde. À ce stade, il est possible d'appeler l'étant individu et le reste du monde milieu associé. En cela, Simondon suit la trace de CANGUILHEM (1952), pour qui le propre du vivant est de composer son milieu, en la généralisant à l'ontologie. On touche ici à l'ontologie dans ce qu'elle a de plus abstrait et indifférencié quand aux choses. Pourtant, lorsque l'on observe le monde qui nous entoure, ce qui est frappant c'est la diversité des catégories d'individus possibles auxquelles nous sommes confrontés.

Ici s'exprime l'empirisme de SIMONDON car étudier l'individuation n'est jamais l'étude de ce phénomène en général mais l'étude des différents modes dont nous constatons l'existence dans le monde. Cette division n'est pas une abstraction, à partir d'un principe formel a abstrait, mais le fruit de ce que l'on appelle le *réalisme des relations*. Pour le poser schématiquement, le réalisme des relations pose l'antériorité ontologique de la relation entre deux termes plutôt qu'à ces termes eux mêmes. Ainsi, dans un exemple tiré de la conception vernaculaire de la physique, être n'est pas être une collection d'atomes mais être l'organisation dynamique d'une collection d'atomes. Ce qui est causal n'est donc pas le terme mais l'événementialité de l'interaction.

Comprendre ce réalisme des relations, permet de comprendre de façon plus claire la notion de préindividuel. Une entrée dans le concept se fait à travers celui de relativité d'échelle. Comme l'explique BONTEMS (2008), la relativité d'échelle correspond à l'idée qu'existent des ruptures entre certains niveaux d'échelle spatiale dans la description scientifique du monde. Il y a, d'autre part, à trouver dans ce concept un élargissement du concept poincaréen (1887) de commodité des objets scientifiques, en cela que certains d'entre eux sont, certes, aisés pour notre usage mais surtout

en cela que des concepts comme l'espace euclidien ne trouvent leur pertinence d'usage qu'au sein d'un ordre de grandeur spatial déterminé.

Tout forme descriptive a donc une validité intrinsèque, que cela soit sa consistance pour un objet scientifique ou bien son intelligibilité s'il s'agit d'un concept. Mais en sus, chaque forme descriptive possède ce que l'on pourrait appeler un domaine de pertinence, c'est à dire une limitation de la réalité qu'elle est susceptible de représenter efficacement. Alors, puisque l'anthropologie n'est plus qu'une visée parmi d'autres pour SIMONDON, l'existence d'une pluralité d'individualités différentes doit conduire à une mise en évidence des conditions d'individuations, qui sont autant de modalités de l'être au monde dans un *Umwelt* déterminé.

*
**

Pour ce qui nous intéresse, il faut tenir compte encore une fois du "pragmatisme" de SIMONDON (1958), c'est à dire de la constatation de départ qu'une machine n'est pas un être vivant et n'est pas non plus un objet physique inerte. S'il y a différence, celle-ci ne saurait provenir d'une variété de substances en raison de l'hypothèse de ce préindividuel indéterminé commun qu'est le monde physique. En effet, en dernière analyse, et, pour qui veut bien descendre à l'échelle subatomique, l'opérateur et la machine sont virtuellement composés des mêmes éléments constitutifs. Dès lors la différence doit se faire soit dans l'organisation soit par l'individuation.

Considérer l'organisation d'une chose, en relation avec sa naturalité, est problématique si on le fait en refusant l'hylémorphisme qui est, apparemment, la seule alternative crédible au créationnisme, théiste ou non. Or, ce que l'on appelle couramment organisation n'est en fait rien d'autre que la structure des relations qui individualisent la chose considérée. Ainsi, dans ce contexte, l'organisation d'une individualité n'est autre chose que la mise en relation des phénomènes subalternes qui engendrent cette individualité, et elle est donc elle même une relation à leur niveau d'échelle ontologique.

Il existe ainsi, dans la pensée simondonienne, une complémentarité d'être entre le physique et le biologique. Le principe d'individuation physique se joue essentiellement sur le plan de l'itération d'un même processus, jusqu'à épuisement de toute possibilité ultérieure, ce qui

correspond à un état d'équilibre thermodynamique. C'est en cela que le cristal et son ontogénèse fournissent à SIMONDON (1958) l'exemple le plus pur de ce qu'est le processus d'individuation. En effet, un cristal se forme à partir d'une solution sursaturée, dans laquelle le plongement d'un germe va engendrer une réaction qui va conduire à la croissance d'une structure, par répétition d'une même forme jusqu'à ce que la solution retrouve un équilibre dans sa saturation. On voit ainsi bien comment le cristal est issu d'un préindividuel métastable, en cela que le principe même de la cristallisation se joue en fonction des paramètres et non des propriétés des éléments qui composent la solution.

Ce qui vaut du cristal vaut de toute matière inerte mais pas lorsque l'on s'intéresse au vivant. Ainsi SIMONDON (1964) pose l'idée selon laquelle "L'individu vivant serait en quelque manière, à ses niveaux les plus primitifs, un cristal à l'état naissant s'amplifiant sans se stabiliser". On retrouve ici l'idée, désormais admise, selon laquelle les structures chimiques primordiales qui permettent le vivant ne sont pas elles-mêmes vivantes. Ainsi, le vivant prend son sens thermodynamique comme système ouvert, lui même métastable, ce qui rejoint la définition qu'en font PRIGOGINE et WIAME (1946) ou L. BERTALANFFY (1968).

De la même façon qu'il peut y avoir une distinction dans la continuité entre le vivant et l'inerte, il existe une continuité entre vivant et humain. L'humain, pris comme individu, est en effet chez Simondon une individualité vivante, qui va réaliser une individuation psychique en parallèle. Alors, la différence historiquement posée entre l'homme et l'animal, fondée sur la possession de la faculté de juger, ne tient plus dans la mesure où penser n'est qu'une manière d'être propice à l'humain. Penser n'est même pas caractéristique de l'humain dans la mesure où ce mode d'individuation ne lui est pas nécessairement réservé. De plus, SIMONDON (1964) insiste sur les dimensions collectives de l'individuation psychique. En effet, la collectivité est également une individualité à son niveau d'échelle.

Chaque individualisation est un particularisme individuel et avant tout historique ce qui fait de la recherche des archétypes non plus celle de formes pures mais celle de points fixes permettant d'explicitier une généricité. Ainsi il n'y a pas à proprement parler d'Humain à étudier mais une humanité, au sens désadjectival proche de l'allemand *Menschheit*. En

cela, d'un point de vue anthropologique, cette ontogénèse individuelle rejoint l'ontogénèse biologique, dans la mesure où les phénomènes qui conditionnent la maturation du phœtus humain sont de même nature que ceux qui conditionne celle du fœtus canin.

*
**

Si l'humain est une individuation continue qui prend son sens dans la collectivité et qu'il faut considérer tout être sous l'angle de son ontogénèse, qu'en est-il de la machine, du moins de l'individu technique ?

Ce qu'on appelle objet technique est en fait un individu, son objectivité est liée fondamentalement à sa perdurance. Il passe donc nécessairement par un processus d'individuation matérielle, qui lui attribue une organisation. A ne pas y prendre suffisamment garde, on serait tenté de voir ici une répétition de la division classique entre le vivant et le technique, l'un provenant de la nature et l'autre de la culture. Seulement, comme on l'a vu, pour SIMONDON (1958), nature et culture ne s'opposent pas, puisque elle sont liées par un continu ontogénétique. La réponse à une interrogation sur la possibilité d'un être vivant technique, aujourd'hui réactivée par les biotechniques mais autrefois rêve d'alchimiste est éminemment positive pour Simondon.

On l'a déjà vu, historiquement, la machine est objet d'ingénierie, elle est donc objet d'ingéniosité et de création. Simondon reprend alors le mode de pensée moléculaire d'Héron en posant l'objet technique comme ensemble d'éléments préexistants. Ainsi, là où le vivant s'individualise de façon progressive et autonome par des phénomènes biologiques, les exemples immédiats d'individus techniques qui viennent généralement à l'esprit du lecteur s'individualisent de façon discrète et par l'influence d'un individu extérieur.

De la même manière qu'il y a une unité du vivant par le partage de phénomènes dans l'ontogénèse, il y a une unité de la technique par cette voie. Dès lors, être technique c'est être issu d'une démarche technique, et, il importe peu que l'être technique considéré mette en œuvre des schèmes biologiques ou non. Il y a là opposition frontale à Heidegger, qui rend exclusive la relation de la technique à la nature, puisque, chez Simondon, l'ontogénèse technique peut, en droit, utiliser des éléments biologiques, au moins à titre ustensilaire. D'un point de vue ontologique, la technique

n'est donc pas un domaine à opposer au vivant et à l'humain, car il n'y a pas de technique sans humanité. Encore une fois, ici, Simondon fait preuve de pragmatisme et d'empirisme. Affirmer qu'il n'y a pas de technique sans humanité ne signifie pas que celle-ci soit inaccessible à l'animal mais que la technique qui nous entoure et qui nous est accessible comme évidence ontologique est intimement liée à l'individuation de l'humanité comme espèce. Ainsi, dans un monde fictif auquel l'humain serait absent, la même technique demeurerait possible pour des espèces dont l'individuation se serait réalisée de façon proche de la notre. De la même manière, la technique animale est fondamentalement une autre forme de technique, puisque ses données d'apparition sont extrêmement différentes. Simondon retrouve alors l'*homo faber* bergsonien qui dépasse le biologique à travers l'utilisation de l'outil.

S'il peut effectuer ce rapprochement, c'est parce que SIMONDON (1958) est ici très proche de LEROI-GOURHAN (1964) et de sa notion d'«exsudation» des objets techniques par l'homme.

Ainsi, là où l'humain est finalement une individualité transitoire entre le monde physique et la collectivité du groupe ou de l'espèce, la technique présente une structure différente et bien moins intégrée. Il faut ainsi distinguer l'élément technique, l'individu technique et le réseau d'objets techniques. Ces trois modes d'existence sont propres à la technique et doivent être jaugés à l'aune de la concrétisation des objets techniques.

*
**

LA concrétisation est un concept clé de SIMONDON (1958) qui désigne l'état d'individuation d'un objet technique donné. La caractérisation de l'objet selon l'usage est difficilement pertinente, dans la mesure où, cet usage peut être obtenu à partir de fonctionnements très divers, il y a par exemple une différence importante entre un moteur à vapeur et un moteur électrique, bien que tous deux puissent être utilisés à une même fin. Dès lors, la catégorisation propre au biologique, basée sur des critères phylogénétiques ne s'applique que très difficilement, puisque la relation d'antériorité/postériorité n'est pas chronologique mais est le produit d'une évolution dans le fonctionnement.

Le caractère concret/abstrait de l'objet technique est une qualification du raffinement de son fonctionnement et constitue une dimension

importante de son individuation. Pour expliciter cette notion, SIMONDON (1958) appelle un exemple lié à la division du travail. Ce qui caractérise la partie d'un objet technique est son ustensilarité, considérée comme la fonction que cette chose est sensée remplir par le concepteur de l'objet. Un objet technique parfaitement abstrait relève d'une quasi impossibilité pratique mais serait un système dont chacune des parties agirait de façon pleinement autonome sans communiquer avec les autres de quelque façon que ce soit. *A contrario* un objet technique parfaitement concret, lui aussi quasi-impossible en pratique, se rapproche de l'objet vivant, car le fonctionnement de chacune de ses parties influence celui des autres en profondeur.

Dans cette idée d'abstrait et de concret, Simondon vise l'objet technique primordial du XX^{ème} siècle qu'est le moteur à explosion et, plus particulièrement, les choix de conception qui en font un objet de plus en plus intégré, selon que la chronologie avance. Il s'intéresse ainsi spécifiquement à l'évolution du design des ailettes de culasse. Si l'on devait trouver une historicité dans l'évolution des culasses de moteur, celle-ci ne pourrait se comprendre dans une optique similaire à celle de la sélection darwinienne pour la première raison que s'il y a, certes, sélection de la solution la mieux adaptée à un contexte, cette sélection se produit de façon réfléchie et en raison de facteurs non essentiellement techniques. En effet, et c'est là le sens de la notion de culture technique, il n'y a jamais d'objet technique en dehors d'un complexe économique industriel quel qu'il soit. Dès lors les critères qui vont conditionner l'adoption d'une solution acceptable à un problème donné ne seront jamais restreint strictement au fonctionnement du système sur lequel le concepteur intervient mais seront également d'ordre économique, politique ou moral.

Dès lors et SIMONDON (1958) le résume très bien, "le problème technique est plutôt celui de la convergence des fonctions dans une unité structurale que celui d'une recherche de compromis entre des exigences en conflit". Ainsi, d'un point de vue abstrait, la partie est un outil et sa fonction peut être remplie par un grand nombre d'objets divers qui sont interchangeables et dont les fonctionnements peuvent être très différents. Si l'on considère un attelage ; dans sa forme la plus primitive ; la fonction motrice peut être remplie par l'humain, un équidé ou même un bovidé. Dans ce cas, tous trois sont interchangeables mais l'on voit bien que selon l'option choisie le fonctionnement de l'attelage va changer. Une même

charrue tractée par un bovidé aura une grande efficacité mécanique mais une moindre manœuvrabilité que si elle était tirée par l'humain. Dès lors, et, bien que le bœuf et l'humain soient des objets vivants, du point de vue du système technique que constitue l'attelage ce sont des éléments techniques.

Il n'y a ainsi pas d'objet technique *en soi* mais toujours en relation à une genèse, c'est à dire une mise en situation par l'humain, une utilisation. En cela, la nature est complémentaire de la technique pour l'humain puisqu'elle contient les premiers outils de celui-ci, que ceux ci fussent des pierres ou bien des êtres vivants, mais surtout parce que l'utilisation ne les dénature pas. Il faut donc distinguer de façon nette ce qui fait un objet technique de ce qui fait un outil, puisque tout objet technique n'en est pas nécessairement un.

L'objet technique complexe, tel qu'on le considère usuellement, est donc initialement un regroupement d'ustensilarités diverses et, à ce titre, il est plus ou moins concret. La concrétisation graduelle dans l'évolution des objets techniques consiste donc en une co-intégration de ces ustensilarités, qui va estomper le rôle d'outil au fur et à mesure. Car, ce qui définit le statut de l'outil est le fait que sa relative interchangeabilité préserve tout de même le fonctionnement du système. Cela implique que, plus un objet technique se concrétise, plus les parties qui le composent deviennent plurifonctionnelles et plus les couplages qui s'effectuent entre elles sont nombreux.

Il y a donc deux accès au statut d'individu technique et, chez SIMONDON (1958), tous deux passent par le statut de "porteur d'outil". Cela tient à la définition même d'individu comme déphasage du préindividuel qui cocrée le milieu associé. Le corollaire de cette définition est que le propre de l'individu est sa capacité d'action et coévolution avec cet environnement associé. Dès lors, ce qui caractérise le progrès technique n'est pas l'automatisation mais l'ouverture du système technique. C'est en cela que le technique peut rejoindre le vivant, de manière certes asymptotique, car tous deux ont pour finalité idéale le même type de système ouvert, dont le fonctionnement est parfaitement couplé à celui de leur environnement.

Ainsi une classification générale de la machine doit se faire selon son rapport d'autonomie à l'opérateur humain, d'un double point de

vue énergétique et informationnel. Ce qui nous intéresse ici concerne l'autonomie informationnelle dans la mesure où elle définit l'interaction primaire entre l'humain et la machine qui diffère selon les cas.

L'opérateur et la machine doivent alors être vus comme deux couples individu/environnement, c'est à dire deux systèmes fortement couplés, à leur propre manière, au reste du monde. Alors, ce qui relève de la communication entre l'un et l'autre se fait sur la base d'un couplage de nature commune à tous deux, ce qui ne peut que prendre la forme d'un échange d'information.

Penser la communication humain(s)-machine(s) impose donc une notion de communication qui aille au delà de celle de SHANNON (1948), au sens où le couple informationnel est en fait toute interaction informative, c'est à dire tout événement auquel l'on peut attribuer une significativité. En termes de classification, cette dimension informationnelle joue un rôle majeur.

On peut ainsi classer les individus techniques selon une échelle continue constituée de quatre catégories archétypales :

- Machines énergétiquement hétéronomes et informationnellement passives. e.g. Marteau.
- Machines énergétiquement autonomes et informationnellement passives. e.g. Télécommande de télévision. Moteur automobile.
- Machines énergétiquement autonomes et informationnellement actives. e.g. Automobile.
- Machines interactives.

Il faut alors prendre garde à une chose importante qui est liée à l'historicité au sein de cette classification. En effet, si l'on considère une lignée technique, c'est à dire l'ensemble transhistorique des représentants d'un type d'objet technique donné, on constate généralement une tendance à acquérir une capacité d'interaction informationnelle qui croît au fur et à mesure du temps.

Seulement, et SIMONDON (1958) insiste bien sur ce point, les lignées techniques ne se comportent pas comme des lignées biologiques. Si elles ont en commun d'être support à une sélection en lien avec un contexte,

toutes deux diffèrent par leur rapport à l'historicité. En effet, les individus biologiques sont issus par génération, ce qui n'est pas le cas des machines, ce qui leur impose une certaine historicité. Dès lors, l'évolution d'une lignée technique n'est pas à considérer d'un point de vue absolu mais doit être perçue comme le corrélat de l'évolution d'un ensemble de besoins et d'une disponibilité de moyens pour y répondre. Si l'évolution des lignées techniques apparaît comme étant linéaire et continue, celle-ci est en fait discontinue et n'est pas dirigée, ce qui rejoint l'un des fondamentaux de la théorie de l'évolution à savoir qu'un individu issu d'une espèce récente n'a ni plus ni moins de supériorité intrinsèque qu'un individu issu d'une espèce ancienne.

Ainsi, de la même manière que l'individu technique concret s'approche de façon asymptotique de l'existence vivante, il existe une individualité plus grande. Là où le vivant s'intègre dans une société ou une espèce, le technique s'intègre dans un réseau qui joue le même rôle de collectivité organisée et organique qui s'articule à la collectivité humaine. Il y a, toutefois, une donnée historique liée à la complexité de cette articulation, dans la mesure où ce réseau technique ultime va significativement modifier les données de la collectivité humaine rendant la relation récursive et nécessaire à l'existence des deux.

On voit là le rôle essentiel de l'information simondonienne, c'est à dire de ce qui explique l'apparition de l'organisation dans un système en même temps qu'elle la fait apparaître et non pas comme une cause extérieure. En ce sens, l'information est ce qui permet de dépasser la simple métastabilité du préindividuel, à travers l'établissement d'un réseau qui n'est rien d'autre qu'une structure énergétique. Dès lors, l'information est avant tout signification chez SIMONDON (1958) alors qu'elle est signifié chez SHANNON (1948) et cette signification a une portée à la fois sémiotique et ontologique à ce niveau.

La machine, ou système technique, est nécessairement un assemblage. Elle est issue d'une conception, c'est à dire de la mise en convergence de différents systèmes dont les fonctions sont susceptibles d'être combinées.

La concrétisation d'une machine correspond à l'équivalent technique de l'intégration biologique. Plus les composantes de la machine seront ajustées les unes aux autres, de sorte que leurs fonctionnements n'entraînent que les couplages désirés, plus la machine se rapprochera d'un système biologique.

Une machine parfaitement concrète n'existe pas. Elle cesserait en fait d'être une machine pour devenir un organisme, en raison de la profonde intégration de son fonctionnement.

3.3 L'INTERACTION

3.3.1 HISTORICITÉ D'UNE NOTION CONTEMPORAINE

LA notion d'interaction est définie comme l'"Action réciproque de deux ou plusieurs objets, de deux ou plusieurs phénomènes.". D'un point de vue étymologique, le premier usage du terme en français date de 1876 et semble provenir de l'anglais selon le TLF. Le terme anglais *interaction* lui même ne date selon l'Oxford English Dictionary que de 1832 et est un terme de physique construit sur la notion d'action à laquelle on ajoute la notion de réciprocité.

Dès lors interagir, pour deux objets *A* et *B*, c'est agir de telle manière que l'action de chacun de ces deux objets influe sur celle de l'autre. Si elle paraît triviale, cette notion d'interaction est pourtant loin d'être simple à décrire d'un point de vue historique. En effet, la notion de réciprocité, qui entre en ligne de compte ici, pose une limite certaine sur l'ensemble des interactions possibles. En effet, pour que deux objets interagissent, a fortiori s'il sont de nature différente⁵², la réciprocité impose que l'action de *A* sur *B* soit de même nature que celle de *B* sur *A*, faute de quoi les deux objets agiront l'un sur l'autre de manière simultanée, mais non pas interactive.

Ceci ne serait qu'un problème de terminologie et de lexicographie, si la notion d'interaction n'était pas devenue aussi centrale dans la conception,

⁵² Un être vivant et un objet inerte par exemple.

à travers son usage physique primitif. Extraire une notion d'un domaine se fait toujours de façon problématique, en cela que les conditions de son utilisation sont bien souvent différentes. Ainsi, lorsqu'au XIX^{ème} siècle la notion d'interaction est issue de la physique, pour entrer dans le domaine général de la philosophie ou des arts empiriques, il faut avoir à l'esprit que ce problème de réciprocité / simultanéité ne se pose pas dans les mêmes termes que pour le physicien, qui dispose d'une axiomatisation et d'un ensemble de concepts permettant de l'éviter.

La pensée grecque classique ne disposait pas de terme correspondant à la notion d'interaction, qui leur aurait été superflue, étant donné le peu de goût de cette culture pour les assemblages techniques complexes. Dès lors la notion d'action suffit et, puisque deux objets peuvent simultanément agir l'un sur l'autre, il reste possible de décrire un monde.

Ainsi, chez PLATON (p. d.-e), l'action est essentiellement considérée comme quelque chose de propre aux être vivants, et non pas aux choses en général. De façon similaire, le platonisme ne s'intéresse que peu à la causalité entre les choses, en tant qu'action de l'une sur l'autre, au delà de sa dimension cosmologique. Ce qui définit alors comment les choses vont coexister est leur participation à un εἶδος⁵³, qui est l'archétype intemporel et immatériel, de ce que l'on considère aujourd'hui comme une abstraction⁵⁴ ou des être vivants. C'est le degré de proximité entre l'objet réel et certains εἶδη qui va faire que ce dernier possède certaines propriétés, et à travers elles les événements que cet objet peut agir ou pâtir.

Une première étape vers ce qui nous intéresse ici va être effectuée par Aristote, notamment à travers sa tentative d'établir une philosophie naturelle. ARISTOTE (p. d.-c) est en effet l'un de premiers à travailler sur la nature (le monde hypolunaire), et en particulier sur le changement, qui la caractérise, a contrario au monde hyperlunaire. L'innovation tient dans l'abstraction de la théorie aristotélicienne de la causalité. Là où, chez Platon, l'identité s'établit par rapport à un archétype, elle se fait alors par composition de forme et de matière. Ainsi chaque chose est le résultat de l'information dynamique d'une certaine quantité de matière concrète, qu'il s'agisse du bois d'un arbre ou de la chair des animaux.

Le devenir individuel chez Aristote est donc le déploiement d'une forme qui va fournir à l'objet ses propriétés, la matière étant à la fois

⁵³ Forme

⁵⁴ le Bien, le Bleu par exemple.

substrat et limitation de cette dernière. Cela permet donc d'envisager une théorie naturaliste de la phylogenèse et de l'ontogenèse dans laquelle le mâle apporte la forme et la matière apporte la matière ARISTOTE (p. d.-a), ce qui explique la variabilité individuelle dans l'espèce de façon plus compréhensive que la pensée platonicienne.

On distingue quatre types de cause dans la pensée Aristotélécienne et en particulier dans ARISTOTE (p. d.-c) :

- Cause finale (Τέλος) : But et finalité de la chose.
- Cause matérielle : Détermination par la nature de la matière de première de la chose considérée.
- Cause formelle : Détermination par la forme de la chose.
- Cause efficiente : Moteur du changement de la chose (inclus sa création et sa destruction).

Ce que permettent ces causes, c'est le passage d'une pensée de l'être des choses à une pensée de leur devenir et si l'on devait alors trouver un équivalent de l'interaction ici, il ne serait que le fait de conjoindre deux choses dans la limite de leur compatibilité. On voit donc bien à quel point la pensée grecque manque des concepts propices à la description utile de la notion moderne d'interaction, par un manque d'intérêt comme par un manque d'abstraction suffisante, en cela que des individus peuvent être causes pour d'autres individus.

Cette physique aristotélécienne, qui repose sur la dualité forme-matière, va perdurer à travers tout le moyen-âge grâce à la philosophie scolastique. Le monopole ecclésiastique sur, ce qui était alors, la recherche scientifique se caractérise essentiellement par une tentative de mise en conformité de la pensée des trois auteurs post-socratiques majeurs⁵⁵ avec les textes bibliques et surtout avec la doctrine de l'église. Ainsi, les catégories causales et l'hylémorphisme d'Aristote demeurent en vigueur jusqu'à Thomas d'Aquin THOMAS D'AQUIN (1273).

⁵⁵ Platon, Aristote et Platon

*

**

NICOLAS COPERNIC, au XV^{ème} siècle, s'il remet en question l'héliocentrisme, va fonder sa pensée astronomique sur la physique aristotélécienne, et la

pensée grecque, comme l'explique bien Koyré KOYRÉ (1933). Pour parvenir à la notion moderne d'interaction, il fallait alors une révolution, non pas astronomique, mais, proprement mathématique, qui va être effectuée par Descartes.

La contribution de Descartes à la sortie du moyen-âge, est généralement assez peu considérée, mais, est essentielle, et tient à deux avancées conceptuelles extrêmement importantes ; la relativité du mouvement et la conservation de la quantité de mouvement. Chez DESCARTES (1644), se trouve l'assertion selon laquelle : « Un même corps peut être considéré comme en mouvement ou en repos selon le repère que l'on adopte. ». Rien ne saurait être plus trivial, à nos yeux, que cette phrase mais elle renverse le paradigme en vigueur, à l'époque, dans la mesure où le mouvement n'est plus ici considéré comme étant le fait pour un corps de rejoindre son *lieu naturel* et, ainsi, réaliser le devenir de son essence mais comme un déplacement. La seconde notion physique complémentaire, la conservation de la quantité de mouvement, pose que la quantité de mouvement dans l'univers est constante. Cette quantité est calculée en faisant le produit de la masse par la vitesse et est intéressante si l'on s'intéresse au cas du choc entre deux corps solides. En raison de ces deux lois, pour Descartes, lorsqu'un corps *A* heurte un corps *B* il va lui transmettre une partie de sa quantité de mouvement et le mettre en branle conformément au principe d'inertie.

Il y a donc, ici, chose intéressante, une explication causale de la percussion entre deux corps de natures possiblement différentes et du déplacement que cette percussion va engendrer tout en modifiant la vitesse de chacun de ces deux corps. Ce constitue le prototype de la notion d'interaction et il ne lui manque que le passage à l'abstraction pour que l'on obtienne la notion couramment utilisée aujourd'hui mais qui nécessite de répondre à un problème qui est celui de la constance du monde.

Le principe de constance du monde est une question métaphysique, dans la mesure où elle touche au fondement même de l'ontologie, mais la position adoptée vis à vis de ce principe conditionne la pratique intellectuelle. On voit alors bien comme se différencient la pensée inductive de Hume de celle, déductive, de Descartes. L'alternative consiste donc entre poser la régularité dans les faits ou bien dans l'esprit. Il

convient de se demander si la loi est une induction à partir du phénomène qu'est la régularité ou si elle est l'expression d'une régulation sous-jacente. Dès lors, soit la science est un modèle (modèle du Tout), soit elle est une entreprise de découverte de la réalité. On retrouve ici le fondement de la dispute entre réalisme et anti-réalisme qui se base sur l'acceptation ou non de la capacité de l'être humain à accéder à la "réalité des choses".

Un argument en faveur de l'hypothèse selon laquelle la science est un modèle est le fait que la démonstration scientifique est en réalité une induction pseudo-complète :

La démonstration scientifique est basée sur la méthode hypothético-déductive. Cette méthode consiste à poser une hypothèse prédictive d'ordre général et à la valider à travers une ou plusieurs expérimentations reproductibles.

Soit un repère temporel T , l'ensemble ordonné des instants successifs (t) de durée infiniment courte à partir d'une date arbitraire.

Soit un repère orthonormé spatial S étant composé par trois ensembles ordonnés X, Y et Z des distances infiniment courtes $(x, y$ et z avec $x \in X, y \in Y$ et $z \in Z)$ à partir d'une origine arbitraire commune tel que $S = \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix}$

Soit $t \in T$ une unité de temps et $x \in X, y \in Y$ et $z \in Z$ des unités d'espace de longueur égale. T, X, Y et Z possèdent les mêmes propriétés que $\mathbb{N}_0$

On définit ainsi les coordonnées spatio-temporelles d'un événement E dans $\begin{pmatrix} T & S \end{pmatrix}$ par $E : n \mapsto \begin{pmatrix} t_n & \begin{pmatrix} x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} \end{pmatrix}$

Démontrer de manière reproductible la validité d'une hypothèse P revient à pouvoir la démontrer pour P_n et $P_{n+\Delta}$ avec $\Delta \in \mathbb{N}$ et $n = 0$. P étant une proposition d'ordre général, la démontrer pour P_0 et P_Δ permet d'en inférer la validité selon une périodicité spatiotemporelle de longueur Δ .

Or, si $\Delta = 1$; l'hypothèse est valide universellement car on est dans le cas d'un raisonnement par récurrence. Toutefois, en pratique, Δ ne peut avoir pour valeur 1 dans la mesure où cela signifierait d'être capable d'effectuer deux expériences identiques à deux instants

strictement successifs ($\delta_t \simeq 0$) en deux points successifs de l'espace ($\delta_x = \delta_y = \delta_z \simeq 0$).

Il est donc formellement impossible d'inférer empiriquement la validité d'une hypothèse de manière universelle. Il est toutefois possible de transformer une induction partielle en induction pseudo-complète, en postulant la consistance des conditions à chaque point de l'univers. Cela est permis par le passage inverse du repère discret à la réalité continue. La nature de ce postulat n'est pas scientifique mais proprement métaphysique. Il n'y a en effet aucune raison scientifiquement justifiable pour que les conditions réunies lors des démonstrations de P_0 et P_Δ soient les mêmes que celles aux coordonnées Δ' mais il n'y a également aucune raison justifiable pour considérer qu'elles puissent être différentes.

Encore une fois, le problème ne vient pas du problème mais du rapport des praticiens à ce dernier. Il y a deux manières de concevoir la consistance de la Nature ; soit la régularité existe bel et bien⁵⁶, soit elle est le produit de la science⁵⁷. On retrouve ainsi le problème du caractère interne ou externe des relations.

Ainsi, en utilisant un modèle, il est possible de neutraliser cette divergence à la condition expresse d'accepter une limitation fondamentale à la complétude de la science.

Toutefois, neutraliser le problème du fondement métaphysique de la démonstration ne permet pas d'en éliminer toutes les implications. En effet, les réalistes sont aussi monistes là où les constructivistes tendent à être atomistes ce qui engendre des incompréhensions à d'autres niveaux.

Pour ces raisons, Descartes est contraint de rejeter la possibilité du vide et des atomes ainsi que l'action à distance DESCARTES (1644) et de poser Dieu comme garant de la continuité et de la conservation du Monde DESCARTES (1641) .

*
**

Il faut attendre la fin du XVII^{ème} siècle, et NEWTON (1684), pour disposer de ce qui est proprement une interaction moderne avec la gravitation. En effet, ce qui manquait à Descartes, pour abstraire la notion d'interaction de celle du mouvement, c'est la notion de force⁵⁸, qui sera établie par

⁵⁶ Réalisme ontologique

⁵⁷ externalisme, atomisme

⁵⁸ À ce sujet on se référera à GUEROULT (1954) qui expose les difficultés rencontrées par Descartes avec cette notion.

NEWTON (1687), comme le rapport entre une quantité de mouvement et un temps, soit $\vec{F} = \frac{d(m\vec{a})}{dt}$, ce qui vient compléter la perspective cartésienne.

On se trouve alors en mesure de décrire et comprendre les phénomènes, non plus à travers un autre phénomène⁵⁹, mais bel et bien à travers un objet mathématique quantifiable qu'est la force. Et c'est seulement à ce stade que l'on peut considérer que la notion moderne d'interaction existe réellement, dans la mesure où elle est action réciproque, dans un certain contexte et selon certaines lois déterminées.

⁵⁹ par exemple le mouvement

Dès lors que l'on dispose de l'objet $F_{A/B} = F_{B/A} = G \frac{M_A M_B}{d^2}$, c'est à dire de l'expression mathématique de la force de gravitation entre deux corps, il est possible de concevoir l'interaction entre ces corps comme ce qui établit un système de couplage. Un système de couplage est considéré ici comme le fait de rendre ou de considérer⁶⁰ deux objets comme dépendants l'un de l'autre dans leur évolution. Ainsi dans le cas de la gravitation, tout changement de masse de l'un des corps va modifier la force gravitationnelle et par voie de conséquence le comportement de l'autre⁶¹.

⁶⁰ Selon que l'on se place d'un point de vue théorique ou pratique.

⁶¹ Par exemple la trajectoire d'un objet en orbite autour d'un autre objet.

Les conséquences sont astronomiques. Pour Copernic, le mouvement héliocentrique était encore lié au lieu naturel de la Terre, ce qui revient à dire que le comportement de la Terre résulte exclusivement de l'actualisation de son essence, ce qui n'a que finalement que peu de choses à voir avec les caractéristiques du Soleil. Dans un monde newtonien, le mouvement héliocentrique est intimement lié à la force gravitationnelle, qui contrevient au mouvement centripète et crée la trajectoire. Dès lors, le comportement de la Terre, comme celui du Soleil, n'est plus la conséquence de son essence mais du système d'interaction entre les deux objets. Ainsi, ce que l'on appelle aujourd'hui *système solaire* n'est plus une zone géographique mais bel et bien le système de couplage gravitationnel dans lequel le Soleil joue un rôle majeur, non pas en raison de sa dimension symbolique mais à travers ses caractéristiques physiques.

Conjointement, ce passage à l'abstraction permet d'effectuer une transition précieuse entre l'ancien point de vue, purement qualitatif, sur les objets d'une connaissance contemplatrice, à celui d'une compréhension quantitative des relations entre les choses. En effet NEWTON (1704) propose déjà une théorie schématique des interactions entre atomes, reposant sur la notion de force⁶², rompant ainsi avec les

⁶² Alors synonyme de molécule.

⁶³ Notamment celle de Gassendi.

théories en vigueur à l'époque⁶³. Cela aboutira aux travaux de LAVOISIER, HASSENFRATZ, de FOURCROY et al. (1787), en Chimie, qui distingue l'atome de la molécule et permet alors de la considérer elle-même comme un système de couplage, permettant ainsi les travaux ultérieurs de Dalton ou Avogadro sur les dimensions quantitatives de ces systèmes.

À partir de LAVOISIER et al. (1787) se passe une chose intéressante, dans la mesure où il est possible d'étudier l'eau de deux manières ; la façon ancestrale consiste à considérer un liquide brillant, non toxique, insipide, bouillant à 100°C et solide à 0°C, alors que, la nouvelle la considère comme un ensemble de molécules en interaction, elles-mêmes étant chacune un ensemble d'atomes en interaction. Il devient donc possible, à partir de cette abstraction que représente la notion d'interaction, de considérer un objet au-delà de ses qualités sensibles et d'accéder, par là, à une connaissance neuve de la nature, dans la mesure où les classifications et les études ne se font plus sur l'apparence des choses, mais sur les phénomènes sous-jacents à ces apparences, et qui sont d'un ordre plus général.

*
**

Ce qu'a donc permis le concept d'interaction, conçu comme on l'a étudié ici, c'est donc une simplification des causes aristotéliciennes qui ne conserve finalement que la cause efficiente, dans la physique et la chimie. Il faut ici prendre garde de ne pas voir les évidentes conséquences de la diversité de forme des molécules en chimie comme une conservation de la cause formelle. Le français nous induit en erreur en traduisant le grec εἶδος par *Forme*, chez Aristote, ce qu'il traduit par *Idée*, chez Platon, afin de marquer la différence de point de vue entre les deux auteurs. Toutefois, le grec distingue εἶδος de μορφή en cela que le second désigne la forme comme figure, ce qui rapproche cette notion de la *Gestalt* allemande, que l'on traduit également par forme. La forme d'une molécule, en tant que configuration de l'espace de cette molécule, n'est donc pas cause formelle mais est en fait une cause efficiente issue de l'interaction des atomes qui composent cette molécule.

Ainsi, lorsque l'on étudie les conditions de possibilité historique de la notion d'interaction, telle qu'elle est utilisée couramment aujourd'hui, on se rend compte que celles-ci ne sont remplies effectivement qu'à la toute fin du XVIII^{ème} siècle, en raison du changement de démarche scientifique

qui intervient alors. En effet, si Newton ou Descartes avaient les concepts qui leur auraient permis de définir une "interaction primitive", leur démarche était tout de même celle de scientifiques antiques, en cela que les objets de la connaissance étaient, pour eux, les objets de la nature et que cette connaissance était principalement qualitative. L'émergence de la physique moderne se caractérise *a contrario* par la connaissance qualitative des données observées au sujet des phénomènes de la Nature. Il n'est alors plus question de rechercher les propriétés essentielles des choses mais d'analyser un comportement observable, ce qui permet de se prémunir de la relation à l'intuition dans la connaissance et la physique du XX^{ème} siècle.

3.3.2 ANALYSE ÉPISTÉMOLOGIQUE

UNE fois mise en perspective historique, la fécondité de la notion d'interaction devient claire. Ce qu'elle permet, c'est le dépassement d'une caractérisation des choses basées sur l'expérience et une classification analytique au profit d'une classification synthétique d'une caractérisation des choses fondée sur l'étude des relations. La façon aristotélicienne de considérer l'objet repose sur sa modélisation en un ensemble de propriétés essentielles instanciées dans une quantité de matière singulière.

Si l'on dispose du concept d'interaction et de la théorie atomique moderne⁶⁴ il est possible de compléter la démarche d'abstraction. Si tout est issu de l'interaction entre une quantité d'atomes observables selon une régularité que l'on peut observer et modéliser mathématiquement alors il n'y a rien de matériel qui ne soit un système de couplage peu importe sa complexité. Cela implique que les objets de la nature ne sont pas en tant qu'objets mais en temps qu'évènements. Que l'on parle d'une montagne ou bien d'un éclair tous deux sont des évènements et le sens commun les considère différemment en raison de leur temporalité très différente.

⁶⁴ C'est à dire à partir de Dalton au début du XIX^{ème} siècle.

Comme le remarque bien Dewey DEWEY (1930) les concepts et lois de la science grecque ont pour eux d'être à la fois simples à comprendre tout en étant proches de l'expérience quotidienne. Malgré le grand mérite de ses travaux, Kuhn KUHN (1962) pose problème lorsque l'on ne prend pas garde aux limites de l'évolution paradigmatique de la connaissance. En effet, la connaissance qui évolue de façon réellement paradigmatique, c'est la connaissance experte qui est susceptible de faire consensus au sein

⁶⁵ Qui peuvent prendre bien des formes, aussi bien d'un point de vue moral que méthodologique.

⁶⁶ En cela un physicien n'est pas nécessairement un biologiste ou un généticien n'est pas nécessairement un géographe.

⁶⁷ Par exemple, il sera aisé de faire reconnaître à quiconque qu'un éclair est un événement et non un objet, en raison de son caractère quasi-instantané. Il sera beaucoup plus dur de le faire au sujet d'une montagne qui est observable pendant des millénaires.

d'un groupe à travers un ensemble d'exigences déterminées⁶⁵, en créant les situations de crise et permettre l'admission des nouveaux paradigmes. Tant que l'on considère la Science comme une collection de disciplines individuées et la connaissance scientifique comme une collection de paradigmes, peu de problèmes se posent. Ils apparaissent lorsque l'on considère la non-expertise de façon positive⁶⁶ et par là le caractère moins contraignant que les exigences ont pour un non-expert que pour un expert. Il ya dès lors un potentiel décalage temporel entre un changement de paradigme chez les experts d'un domaine et son exportation chez les non-experts en raison de la durée d'établissement de ce paradigme et de celle nécessaire à son enseignement et sa vulgarisation.

Ce processus se fait donc au niveau sociétal en deux temps et selon des temporalités bien différentes. Cela pose problème lorsque l'on considère la relative nouveauté de la notion d'interaction telle qu'on l'a décrite car les implications qu'elle porte sont extrêmement contrintuitives⁶⁷ d'une part et sont d'un intérêt utilitaire relativement négligeables.

*
**

Comme vu précédemment, l'humain comme la machine sont tous deux le résultat de processus d'individuation différents mais qui aboutissent tous deux à l'établissement d'un couple individu/environnement. Puisque l'un comme l'autre sont essentiellement déterminés et doivent leur conservation à l'ensemble des couplages qui forment ce couple, il est possible d'éclairer la notion d'interaction humain-machine par cette voie.

En effet, la manière de s'individuer comme déphasage d'une réalité préalable permet de considérer que l'humain est une partie de l'environnement de la machine et inversement. Dès lors la mise en relation de ces deux individualités ne peut se faire qu'en étudiant deux groupes de couplage de nature différente en cela qu'ils sont biologiques pour l'humain et physiques pour la machine.

Cette vision de l'interaction est classique et considère ces deux systèmes comme clos sur eux mêmes et possédant des relations au reste de leur environnement. Les considérant comme des systèmes ouverts, il devient possible de déterminer un nouveau mode d'individuation partielle qui est celui de l'usage.

SIMONDON (1958) insiste sur la notion de "porteur d'outil" qui est importante à plus d'un titre, notamment car elle permet de mettre en évidence l'éventuelle ustensilarité d'un grand nombre d'individus. Faire usage d'une machine, ou même d'un ustensile, c'est entrer en union avec elle à titre plus temporaire. Une nouvelle individualité se forme avec le couple humain-machine qui est l'"humain porteur d'outil" et qui dispose de caractéristiques nouvelles⁶⁸.

Cette modalité d'existence individuelle se caractérise alors par une catégorie particulière de couplages qui se distinguent des autres et sans lesquels l'humain et la machine ne pourraient faire système. Ces couplages sont de nature physique si l'on s'intéresse uniquement à leur dimension interfaciale mais cela reviendrait encore une fois à considérer les systèmes en question comme clôturés sur eux mêmes.

Considérer l'interaction sous l'angle d'une communication entre systèmes ouverts différents exige donc d'avoir un vecteur unique qui conserve sa pertinence selon le sens que prend l'interaction. Ce vecteur unique peut être considéré comme une communication en ce sens qu'il est non réciproque. Ainsi chez SIMONDON (1958), la notion d'information prend un sens nouveau. Il y a information là où il y a signification en un sens particulier qui est celui d'un événement qui modifie l'évolution d'un système. Ainsi cette notion de signification et d'information est bivalente dans son application mais unifiée d'un point de vue symbolique et sémiotique.

Ainsi, même s'il y a, du côté machine un encodage matériel ou logique, ce n'est pas pour autant qu'il y a communication, il y a communication parce qu'un autre système produit une influence sur lui, que celle-ci soit désirée ou non par le concepteur. De la même manière, peu importe la perspective théorique que l'on adopte, l'influence du système sur l'opérateur sera essentiellement déterminée par l'opérateur lui même.

Il est alors possible de rapprocher ce problème de celui que tente de résoudre GIBSON (1979) qui adopte une définition similaire de l'information avec sa notion d'*information pickup* qui doit être considérée comme un rapport dynamique de l'individu à sa relation à l'environnement et non pas comme une analyse algorithmique du donné sensible. De façon similaire, cela est à rapprocher du *frame problem* décrit par DREYFUS (1972,

⁶⁸ À ce titre, on considérera l'exemple du fantassin d'infanterie et de son équipement qui, en opération, ne doit plus être considéré selon son individualité civile mais selon des caractéristiques militaires.

2007) et qui détermine la capacité des intelligences artificielles à percevoir dans leur environnement ce qui est significatif pour leur évolution.

Le *frame problem* a été initialement théorisé par MCCARTHY et HAYES (1981) en relation avec la nécessité, pour pouvoir faire en sorte qu'une machine agisse dans le monde, de disposer d'un ensemble spécifique d'axiomes permettant à la machine d'inférer des règles à propos de son environnement. Cela impose pour donc, pour qu'une intelligence artificielle soit efficace, de disposer *a priori* d'un modèle logique complet du monde ou bien des moyens de générer ces règles à partir des données disponibles et surtout de déterminer à chaque instant quelles règles sont pertinentes.

S'il ne prend pas explicitement cette forme dans le vivant, ce problème est central dans la conception envisagée comme établissement de couplages significatifs entre un opérateur et une machine. En effet, la signification d'un événement n'est jamais qu'une donnée additionnelle de celui-ci et son statut même d'événement significatif est également relatif à un observateur.

C'est en cela qu'il ya concordance avec GIBSON (1961, 1977) qui définit les affordances comme la propension de l'environnement à guider la conduite d'un individu en fonction de l'état interne de celui-ci. La signification d'un élément de l'environnement n'est donc pas ici une propriété de celui ni une construction individuelle mais la résultante de l'être en situation de l'individu, ce qui en terme simondoniens est l'ensemble des couplages entre l'individu et son milieu associé. À ce titre, concevoir une interface peut être considéré comme une tentative de réduire au maximum l'apparition d'affordances jugées indésirables en égard aux buts que l'on donne au système.

Dès lors, le *frame problem* et surtout l'incapacité de disposer d'un modèle formel complet du monde oblige à considérer la possibilité de la machine à afforder. Une machine ne perçoit pas son environnement mais le représente numériquement et c'est sur la base de cette représentation que vont s'effectuer le raisonnement ainsi que l'action. Ainsi d'un point de vue phénoménologique il est nécessaire d'admettre que les machines ne sont pas *dans* le monde ou au moins de la manière dont le sont les êtres vivants ce qui correspond à la notion de *machine ouverte* que SIMONDON (1958) pose comme terme du progrès technique dans la mesure

où seule cette machine hypothétique serait en capacité d'adopter un mode perception directe propice à l'affordance.

Résumé

L'interaction permet d'expliquer l'évolution d'un système par rapport à celle d'un autre système. Elle est profondément liée à la temporalité puisqu'un événement se produisant avant un autre sera susceptible d'être considéré comme sa cause.

Dans les systèmes complexes, le couplage est l'ensemble des interactions entre deux systèmes. Le couplage s'établit généralement à plusieurs niveaux de hiérarchie et produit un lien entre les deux systèmes. Ce lien de couplage, s'il est suffisamment important, mène à l'établissement d'un système contenant les précédents.

L'usage d'un système technique est un couplage entre un humain et un objet technique. Il est lié aux capacités sémiotiques des deux systèmes qui sont différentes selon leur nature. Le système technique ne perçoit pas son environnement mais décode un ensemble de signaux alors que l'utilisateur perçoit des possibilités d'action dans son environnement.

Qu'est ce qu'une épistémologie de l'interaction ?

LORSQUE l'on s'attelle à l'analyse des trois termes qui composent la notion d'*interaction humain(s)-machine(s)*, l'on s'aperçoit bien vite de la dimension extrêmement moderne de ceux-ci. Cette analyse abstraite permet d'aborder la question de l'usage des objets techniques comme un ensemble de relations. Cet ensemble de relations se fait entre deux systèmes préalablement inscrits dans leurs environnements respectifs.

Cette inscription est complexe à expliciter puisqu'elle tient, du côté de l'utilisateur, aux modes que pose ARENDT (1958), travail, œuvre et action. Nous mettons, ici, de côté l'action, qui recouvre les aspects sociaux et politiques de la vie humaine, car elle dépasse quelque peu le champ de notre travail. Il apparaît bien vite que ce que les ergonomes appellent activité, et qui est ce que TEIGER et FALZON (1995) définissent comme "processus d'interaction intelligente d'un opérateur avec les exigences de sa tâche, les contraintes de l'environnement, son état interne, ses objectifs individuels, résulte d'une construction personnelle à celui-ci", relève en fait d'une relation de l'œuvre au travail.

Chez ARENDT (1958), cette relation est nécessaire à la possibilité de la communauté humaine, entre consommation et construction. Mais ce qui nous intéresse ici est le fait que les modes de la condition humaine sont nécessairement amenés à concourir et, par là même, à entrer en conflit. Surtout, la notion de *vita activa* refondée par ARENDT est intéressante dans la mesure où elle propose la fondation d'une anthropologie autour de l'*homo faber* et non pas de l'*homo sapiens* et, comme nous l'avons vu dans l'introduction, cet *homo* est *sapiens* parce qu'il est *faber* et non pas l'inverse. L'Humain est donc avant toute chose un animal actif⁶⁹ et c'est

⁶⁹ Par opposition à la passivité propre à la *vita contemplativa* qui constitue le but de la philosophie socratique.

cette activité qu'il faut étudier si l'on veut parvenir à comprendre son rapport aux objets qu'il cotoie.

Si l'on adhère à ce point de vue sur l'anthropologie, cela change notre relation à l'objet technique, puisque son utilisation n'est pas seulement liée à la rationalité de l'opérateur et à ses compétences. L'opérateur est, comme nous l'avons vu en 3.1.3, un organisme *en acte*, toujours immergé dans un environnement. La mise en relation avec un outil donné n'est alors, en définitive, qu'une modification de cet environnement.

Alors, si l'on veut comprendre la nature de l'interaction humain(s)-machine(s), il est nécessaire de la traiter dans sa généralité, c'est à dire comme un mode particulier du comportement individuel, particulier à travers ses enjeux d'une part, et, à travers ses modalités d'autre part.

Ce qui fait différer l'humain de la machine est le fait que l'un est organisme, l'autre pas. Être un organisme, c'est atteindre, en tant qu'individualité, une certaine intégration interne correspondant au degré ultime de ce que SIMONDON (1958) a nommé concrétisation. L'organisation *partes extra partes* d'un système technique permet que l'on y trouve différents niveaux d'échelle engendrant une complexité qui va générer de l'entropie et, donc, rendre le système instable lorsqu'elle augmente. Or, cette augmentation de l'instabilité suivant la complexité d'organisation n'est pas observable dans le vivant.

CHAUVET (1995) propose une Théorie Mathématique de la Physiologie Intégrative⁷⁰ qui permet de répondre à cette problématique. MTIP repose sur trois principes :

⁷⁰ Abrégé en MTIP.

1. L'Interaction Fonctionnelle : interaction non symétrique, non locale entre ce que CHAUVET (1993a) nomme une *source* et un *puits*. Cette interaction repose sur la relation {émetteur / récepteur} entre la source et le puits. Elle est non symétrique dans la mesure où, contrairement aux interactions physiques, sa signification est déterminée par le comportement du puits. Sa propriété de non-localité renvoie à l'apparente action à distance qu'elle permet. En fait, l'interaction fonctionnelle est une interaction non locale parce qu'elle s'établit par l'entremise d'une structure physico-chimique intermédiaire qui va se déplacer à travers les discontinuités structurales du système biologique.

2. Le Principe d'AutoAssociation Stabilisatrice : CHAUVET (1993a) montre que l'existence de deux structures physiques au voisinage l'une de l'autre peut engendrer des modifications de leur évolution. Ce principe repose sur l'Interaction Fonctionnelle ; l'une des deux structures est susceptible de produire une molécule, ou un autre objet physico-chimique, qui va influencer l'évolution de l'autre. Cette influence peut mener à la situation dans laquelle les deux structures se couplent, c'est à dire qu'elles vont littéralement bénéficier de leur proximité et ainsi créer une structure de plus haut niveau plus stable que ses composantes.
3. L'Orgatropie : CHAUVET (1993b) propose un "équivalent" biologique à la notion d'entropie fonctionnelle. L'*orgatropie* décrit l'évolution de l'organisation d'un système biologique. Ce principe repose sur le fait que le potentiel d'organisation du système dépend du rapport entre le nombre de puits et le nombre d'unités structurales⁷¹ qui le composent. Ainsi, plus le nombre de puits par rapport aux autres unités structurales est élevé, plus le système tend à se spécialiser jusqu'à un certain point. CHAUVET (1993b) pose également que, sans réorganisation, la croissance du système biologique va faire croître son orgatropie. Ainsi, c'est ce principe d'orgatropie qui va causer la création de nouveaux niveaux d'organisation au sein du système, ce qui va contribuer à réduire cette orgatropie et va constituer des systèmes fonctionnellement plus spécialisés.

⁷¹ Une unité structurale est un objet qui peut être, soit une source soit un puit.

Ce qui nous intéresse ici est l'Interaction Fonctionnelle, dans la mesure où elle conditionne profondément la relation entre l'organisme et son environnement. La dimension sémiotique qui est nécessaire à l'interaction humain-machine est, comme on l'a vu, un coproduit de la perception. A cet égard, il faut considérer la perception comme une fonction de l'organisme et des éléments son environnement, ce qui fait de l'interaction sémiotique une interaction fonctionnelle, au sens où l'entend CHAUVET (1995) c'est à dire qu'elle est asymétrique et non-locale. Dès lors, dans un système anthropotechnique contenant, à la fois, l'humain et la machine ce type d'interaction doit être considérée comme une composante de l'évolution du système et l'ensemble des interactions significatives qui correspond à l'usage du système est alors l'ensemble des interactions sémiotiques nécessaires à la mise en œuvre de ce système.

Alors, il devient nécessaire d'envisager le système anthropotechnique comme un système biologique. Bien évidemment cela ne veut pas dire qu'une automobile prend vie lorsque le conducteur démarre le moteur, mais que la centralité des interaction sémiotiques, ainsi que des couplages entre la machine et l'opérateur sont les interactions qui permettent de remplir les fonctions essentielles du système. De façon générale, une majeure partie de ces interactions qui constituent l'usage est prise en compte de manière tacite par le concepteur en cela qu'elles relèvent de l'anthropométrie que l'on doit alors considérer comme le point de départ de l'établissement des interactions humain-machine.

En regardant les choses sous cet angle synthétique, il devient clair que deux tendances majeures s'expriment dans l'anthropologie et la cosmologie. Ces deux tendances ont, comme on l'a vu une historicité complexe puisque lorsque l'on parle ici d'hylémorphisme il nous faut le considérer dans sa portée historique réelle, c'est à dire hors de son expression aristotélicienne. En effet, l'opposition réelle entre la doctrine platonicienne affirmant un dualisme dur et la doctrine aristotélicienne ont été réunies au moyen-âge par la scolastique qui a fait office de pensée classique. Les épistémologies et cosmologies présocratiques ou non-socratiques⁷² qui sont d'une grande diversité n'ont en réalité qu'une actualité assez contemporaine. En effet, le premier corpus de référence sur la doctrine des philosophies présocratiques nous provient des travaux de DIELS (1903) bien que des auteurs comme Hegel ou Nietzsche se soient fortement intéressés à ce domaine auparavant.

Cela fait de la forme, contrairement à ce que l'on trouve dans la tradition hylémorphique, une donnée du système issue de son organisation, c'est à dire dans le vivant le résultat d'une géométrie permettant au système de perdurer à travers un *optimal de stabilité* qui est un ensemble de paramètres pour lesquels celui-ci reste viable. Par l'intégration et le PAAS, ainsi que par transmission phylogénétique la forme est donc avant tout le résultat de l'organisation et non pas la cause de celle-ci. Dans un système technique, puisqu'il y a conception, la forme est également une recherche d'optimum fonctionnel mais cette fois ci elle se trouve calculée en fonction des exigences ce qui en fait une caractéristique qui va permettre de structurer le comportement des éléments du système en fonction de leur architecture. Il ne faut alors donc pas classer les systèmes techniques et les systèmes vivants en fonction de leur forme mais selon

⁷² On pensera par exemple ici à l'épicurisme ou au stoïcisme.

leur fonction, chose moins évidente de prime abord mais qui permet, dans la technique, d'obtenir une cladistique plus efficiente et, au sein de l'ontologie, d'atteindre un niveau de généricité propice à la création d'hypothèses de conception.

De même, la tradition cognitive computationnaliste, qui représente l'humain comme un analogon de la machine de van Neumann, cherche à construire et développer une théorie de la nature de l'esprit et, se faisant, divise l'unité biologique et sociale qui fait l'individu humain. En s'intéressant non pas à la Conscience mais à l'ensemble des interactions qui fondent l'existence individuelle on s'aperçoit bien vite qu'il existe une structure complexe qui permet ce phénomène de conscience mais que celle-ci n'est pas première dans l'ordre des causes, elle est une fonction de l'ensemble de l'organisme et non pas une entité détachable de celle-ci. Dès lors, ce n'est pas parce qu'il y a information qu'il y a encodage et décodage et cette information sera de toute façon une donnée des interactions environnementales de l'individu humain.

*
**

LORSQUE l'on s'intéresse aux dépendances épistémologiques des différentes anthropologies actuellement disponibles⁷³, il devient vite flagrant que l'extension d'un concept comme la sérendipité⁷⁴ est fortement variable puisque les définitions mêmes de l'invention divergent énormément. Cela confirme la maxime voulant que la conceptualisation détermine la conception. Il ne faut pas voir, dans la relation de dépendance épistémologique un lien de causalité mais une conditionnalité. Il faut alors lire les figures 3.1 (page 142) et 3.2 (page 143) de façon explicative, c'est à dire en remontant depuis anthropologies vers les cosmologies. Ainsi on manifeste le fait qu'une théorie trouve toujours sa justification dans une autre théorie. En cela, les diagrammes ne sauraient être exhaustifs et les flèches en pointillé montrent la parenté entre différentes anthropologies. Dès lors, souscrire à une anthropologie ou adopter un concept ne peut se faire sans considérer son intension.

La claire division entre matérialisme et hylémorphisme est à la fois une donnée historique mais nous intéresse en cela qu'elle concerne le rapport entre le système et ses propriétés. Le matérialisme pose comme premier principe que la forme est le résultat de l'organisation de la matière⁷⁵ alors

⁷³ Cf. tableau 3.2 (page 106).

⁷⁴ Voir p. page 47. La sérendipité est, pour un système, la capacité à être utilisé de façon imprévue afin que l'utilisateur puisse réagir à un accident.

⁷⁵ Dans un sens très large d'organisation.

que l'hylémorphisme postule que les choses possèdent des qualités réelles indépendantes de la manière dont elles sont actualisées dans le monde. Ce qui en découle est un rapport divergent à la nature humaine qui, comme on l'a vu, se scindent en plusieurs traditions.

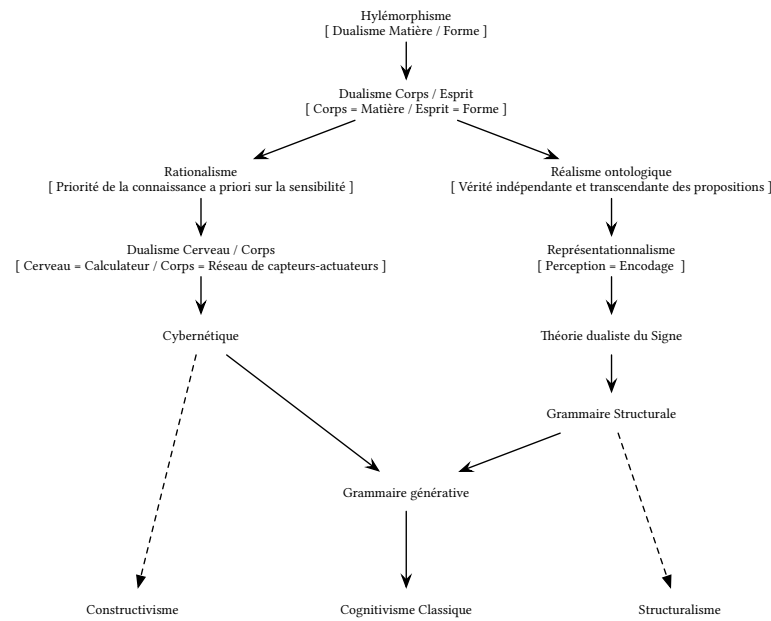
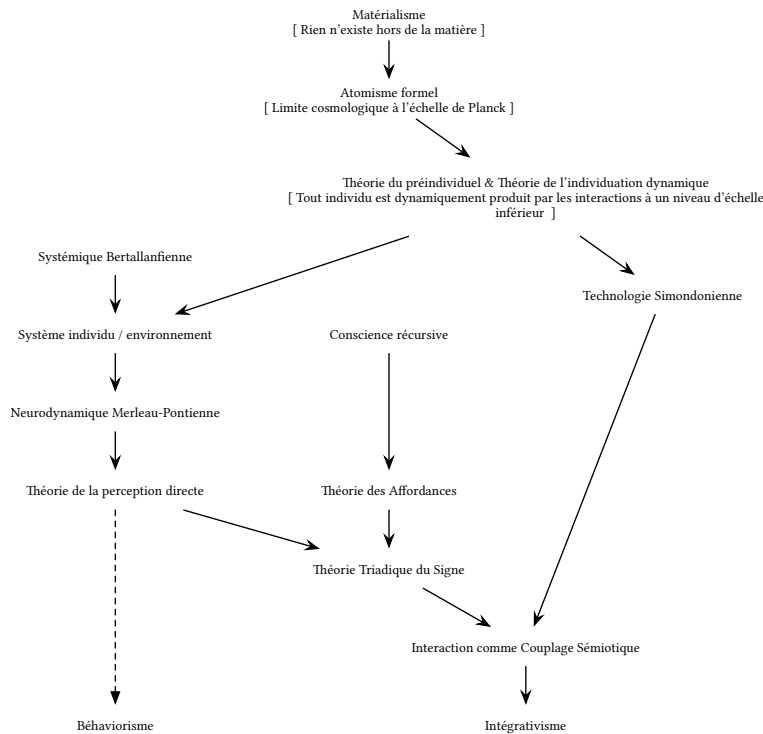


FIG. 3.1 : Dépendances épistémologiques des traditions liées à l'hylémorphisme

Cette caractérisation de différents courants théoriques est importante, car comme nous allons le voir dans la seconde partie, certains modèles possèdent un ancrage théorique important alors que d'autres ont été constitués de façon à se détacher de ces considérations. Ce que l'on a mis en exergue dans cette première partie est que seule une approche matérialiste de l'anthropologie permet d'éviter les apories de la doctrine computationnaliste telles que la théorie modulaire des facultés ou la réduction informatique de l'esprit humain. Comme le montre la figure 3.2 (page 143), la tradition matérialiste se manifeste dans l'intégrativisme et pourrait éventuellement se rapprocher du behaviorisme. Toutefois, l'approche behavioriste, bien qu'intéressante, se refuse à intégrer aussi profondément des considérations d'ordre biologique ou sociologique que l'intégrativisme ce qui la rend délicate à utiliser comme base à la modélisation des systèmes sociotechniques et anthropotechniques.

Conjointement, en établissant le système anthropotechnique comme faisant nécessairement partie d'un système sociotechnique, l'on a vu

FIG. 3.2 : Dépendances épistémologiques des traditions liées au matérialisme

que ce qui permet et conditionne l'interaction humain-machine dans son ensemble est un ensemble de facteurs dont une partie n'est pas dépendante des caractéristiques de l'humain ou de celles de la machine. Cela se traduit toutefois par une influence de ces facteurs extrinsèques sur les interactions significatives dont les exemples les plus flagrants se trouvent dans l'entraînement ou les facteurs culturels.

Chercher à construire les premiers principes de ce qui serait une ontologie de conception, c'est à dire le cadre permettant de décrire et d'analyser un système anthropotechnique de façon à en prédire l'évolution, doit donc se faire à partir d'une anthropologie intégrative. Celle-ci est décrite dans la figure 3.2 (page 143) et se structure essentiellement autour de l'idée que la signification d'un objet donné, considéré comme signe, est essentiellement fonction de l'utilisateur et qu'elle est surdéterminée par un ensemble de facteurs culturels et physiologiques.

Au delà de cette anthropologie, notre ontologie de conception va également devoir tenir compte des spécificités de l'interaction biologique

telle que la définit CHAUVET (1995) et dont les implications sur la caractérisation de la perception sont importantes.

Les problématiques majeures de la conception de systèmes anthropo-techniques relèvent de leur dimension sémiotique ainsi que de la mise en couplage d'un système technique avec un système biologique. Ces systèmes sont extrêmement différents puisque les premiers sont organisés à travers l'intégration via une causalité événementielle alors que les seconds le sont via une causalité classique.

Toutefois, ces deux types de systèmes ont en commun d'être descriptibles à l'aide d'une abstraction de leur fonctionnement qui est la fonction. Ainsi, la conception d'un système technique se révèle, en dernière analyse, être l'organisation d'un ensemble de fonctions qui permettent, à partir d'un ensemble de spécifications données, d'atteindre un ensemble d'exigences données. Au contraire, les systèmes vivants ne sont pas, à proprement parler, conçus. Leur évolution individuelle et leurs caractéristiques sont causalement premières et les fonctions sont alors ce qui permet de décrire, à partir de cet ensemble d'exigences, un ensemble de paramètres permettant les spécifications techniques.

*
**

FASS et CHAUVET (2006) ont proposé une application de MTIP permettant de fournir un cadre de conception propice à la modélisation du couplage existant entre un individu et la machine qu'il utilise. Ce cadre de conception repose sur le principe fondamental que la fonction du système humain(s)-machine(s) est le résultat d'un ensemble d'interactions fonctionnelles, hiérarchiquement et fonctionnellement organisées, entre les deux systèmes.

Cela permet à FASS (2012) d'établir, et décrire dans la figure 3.3 (page 145), un cadre de conception intégratif en cela qu'il exprime la relation complexe entre spécifications, exigences et fonction. Dans le cadre qui nous intéresse, c'est à dire celui de l'interfaçage humain(s)-machine(s), cette fonction de couplage permettant de constituer l'unité d'un système sera l'interaction sémiotique, telle que nous avons cherché à la mettre en évidence. Ainsi, la conception d'une IHM revient à rechercher comment faire en sorte que cette interaction sémiotique évolue de façon satisfaisante aux exigences du système tout en garantissant sa stabilité.

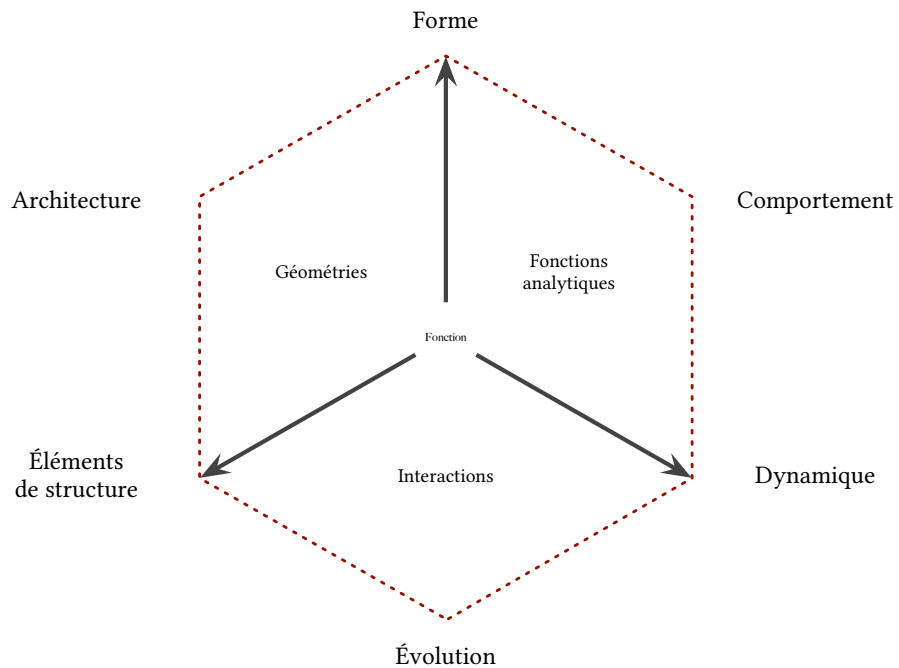


FIG. 3.3 : Le cadre de conception intégratif, selon Fass (2012) : Les fonctions du système sont la résultante de l'organisation des éléments de structure, des formes et des dynamiques de ce système qui en forment les exigences. De ces exigences, émergent les différents plans de spécification du système (Architecture, Comportement, Evolution).

FASS (2006) replace alors les facteurs humains au centre de la démarche de conception, non uniquement au sens de données anthropométriques, mais, comme un ensemble d'exigences liées aux propriétés notamment physiologiques de l'utilisateur. Il devient alors possible de spécifier le système en fonction du résultat de l'évolution d'ensemble de l'organisme de l'utilisateur c'est à dire en décrivant, par exemple, le geste, non pas comme l'évolution d'une forme ou le déplacement d'un point, comme un ensemble d'événements chronologiquement et fonctionnellement transitiifs les uns avec les autres et dont l'évolution se fait selon différents niveaux de structure.

Comme nous allons le voir dans la seconde partie, cette prise en compte et cette modélisations des facteurs humains représente une dimension primordiale de la conception des interfaces humain(s)-machine(s). En effet, l'interaction sémiotique, centrale pour assurer que le comportement de l'utilisateur puisse être conforme aux prescriptions du concepteur, doit nécessairement se produire dans des conditions propices. Les outils que nous allons donc analyser visent à s'assurer de cette stabilité des conditions du couplage.

**

D'un point de vue matérialiste, la séparation arendtienne entre œuvre, travail et action thématise un problème fondamental de notre représentation de l'opérativité. En effet, celle-ci doit nécessairement inclure ce qui découle de la concurrence des modes de l'existence humaine qui traverse la réalisation de toute tâche.

En effet, même si l'on considère le problème sous un angle systémique, l'opérateur n'est pas un système biologique qui deviendrait un système cognitif, une fois passé un certain niveau d'échelle. Ces niveaux d'échelle se surajoutent les uns aux autres, constituant ainsi une unité d'être dans l'individuation. Cela vaut, par ailleurs pour l'humain comme pour la machine, puisque la construction d'un système technique ayant une partie biologique utilisée, en tant que partie technique c'est à dire de façon partiellement intégrée, ne produit pas nécessairement un système vivant.

Le problème de l'interaction humain(s)-machine(s) prend alors une nouvelle complexité tout en devenant plus clair. Il peut être résolu de deux façons. La première technicise l'opérateur, c'est à dire qu'elle lui ôte toute dimension humaine, que celle-ci soit biologique ou intellectuelle, le faisant ainsi passer comme une *pièce détachée* du système. Cette voie conduit, pour SIMONDON (1958) à l'aliénation de l'humain qui n'est pas souhaitable d'un point de vue éthique mais qui conduit également à l'annihilation de toute créativité de la part de l'opérateur ce qui selon HOBBS et al. (2008) conduit à une perte de robustesse pour le système.

La voie que nous préférons ici est celle de l'intégration de l'opérateur humain, intégration qui doit se faire sous une pluralité de modalités. La première de ces modalités est le facteur humain biologique qui pose la question de l'intégration des spécificités de l'opérateur en tant qu'être vivant et leur prise en compte dans la conception. Cela comprend le fait que le système puisse être vivable pour l'opérateur, d'un point de vue physiologique, mais également qu'il fournisse les moyens à l'utilisateur de réaliser ses tâches en conformité avec ses caractéristiques.

Affirmer cela n'est qu'une partie de la solution, puisque l'aliénation peut évidemment tenir compte du facteur humain biologique. Pour intégrer l'opérateur au système, il faut donc également tenir compte du

facteur humain anthropique, c'est à dire faire en sorte que l'opérateur demeure un individu humain lors de l'usage de la machine.

Cela est complexe si l'on considère dialectiquement ce qui doit être pris comme une unité concurrentielle. Il existe une possibilité de modéliser de façon séparée les divers mode d'existence de l'opérateur, ce que tend à faire l'approche cybernétique. Ainsi l'on crée une dualité entre l'agent, chargé d'exécuter des tâches et son organisme. Mais cette dualité n'existe pas dans les faits. Elle est liée au comportement de l'opérateur. Ainsi, il ne faut pas voir le pilote d'un avion comme un servomoteur doté de propriétés biologiques mais comme un organisme vivant "se comportant comme" un pilote d'avion.

Ainsi, un pilote est, abstraitement, le résultat d'une construction socio-technique liée à des facteurs biologiques, et sociotechniques. Le pilotage est un concept dont la fonction est de surdéterminer le comportement de celui ou celle qui l'assume. L'une des données du facteur humain anthropique est donc de construire est de faire évoluer le concept de pilotage en fonction de la variété et de l'évolution des appareils mais également en fonction des individus qui vont assumer ce rôle.

En cela, concevoir un appareil aéronautique nécessite donc de concevoir un pilote, en tenant compte de la biologie, mais aussi des capacités d'action de l'opérateur et des facteurs sociotechniques mis en évidence par BOOHER (2003). Ces trois facteurs sont liés à l'œuvre, au travail et à l'action qui permettent ainsi d'envisager comment les facteurs humains se manifestent simultanément dans toute activité humaine.

Du point de vue de l'interaction sémiotique, centrale pour l'IHM, les facteurs humains sont donc primordiaux, bien au delà de la simple compatibilité biologique de la machine. Ce sont eux qui vont conditionner le rapport de l'opérateur aux situations opérationnelles et ainsi moduler son comportement.

Dans la seconde partie de cette thèse, nous allons analyser deux outils de modélisation. Les critères ergonomiques de BASTIEN et SCAPIN (1993) permettent de mettre en évidence l'impact négatif de certaines propriétés de l'IHM sur le comportement de l'utilisateur conduisant à des problèmes fondamentaux d'utilisabilité, ils contribuent en cela à une prise en charge des facteurs humains à différents niveaux mais sont principalement liés aux conditions de mise en place d'une interaction sémiotique stable.

MIDAS, modélise la performance humaine, c'est à dire la manière dont un opérateur va réaliser un ensemble de tâches dans un contexte déterminé. Il permet d'évaluer en quoi certaines hypothèses de conception vont ou non amener une dégradation de l'utilisabilité dans certaine circonstances.

Nous voyons ces outils comme complémentaires l'un de l'autre, malgré leurs différentes démarches. Grâce au cadre de conception intégratif et à l'épistémologie que nous avons mise en lumière, nous proposons une réforme des critères de BASTIEN et SCAPIN (1993) susceptible de porter une formalisation des facteurs humains liés à l'utilisabilité. Cette formalisation mène à l'établissement des principes d'une ontologie de conception, dont nous proposons un usage, permettant d'élargir la portée descriptive de MIDAS, permettant ainsi d'en faire un outil de modélisation dynamique des facteurs humains et de leur impact sur le comportement de l'opérateur.

Deuxième partie

Vers une ontologie de conception

Vers une ontologie de conception

En langage informatique, la notion d'ontologie définit un outil conceptuel permettant de décrire une portion du monde. Elle se compose de deux types d'éléments, les objets et les relations. Dans la première partie, nous nous sommes attachés à décrire les deux principaux types d'objets nécessaires à la description d'un système anthropotechnique ainsi que la notion d'interaction de façon générale.

Dans cette partie, nous allons préciser cette analyse de l'interaction de façon à pouvoir décrire plus avant celles qui ont lieu au sein des systèmes anthropotechniques, que nous appellerons interactions fonctionnelles. Cela permettra d'analyser les critères ergonomiques de BASTIEN et SCAPIN (1993) en mettant en évidence leur structure logique d'ensemble avant d'en inférer les changements à envisager pour les intégrer à notre anthropologie et en renforcer la portée.

Ce modèle logique et ontologique de l'interface humain-machine nous conduira également dans l'analyse du modèle MIDAS, développé par la NASA qui a pour but de décrire et de prédire finement la performance dans l'utilisation d'un système anthropotechnique. De cette analyse, on cherchera à définir comment renforcer la dimension ontologique du modèle afin d'en améliorer la puissance descriptive.

CHAPITRE 4

Ontologie de conception

L'**INTERACTION** sémiotique, telle que nous l'avons définie, comme caractéristique fonctionnelle des systèmes humains(s)-machine(s) est fondamentalement asymétrique. Cela recouvre la double problématique de la conception et du dialogue humain(s)-machine(s) qu'est la compréhension d'un système par l'autre.

Une part importante du processus de conception est donc de faire en sorte que les entrées de la machine et les fonctions qui la font fonctionner soient correctement coordonnées, c'est à dire qu'elle puisse déduire les bonnes données à partir de ses capteurs en fonction de son logiciel.

L'autre part, qui nous intéresse ici, est la dimension complémentaire de l'interaction. Elle représente la manière de faire en sorte que l'humain puisse agir sur la machine en comprenant la situation dans laquelle se trouve le système. Contrairement à la machine, pour laquelle les éléments esthétiques sont encodés par le capteur et décodés puis catégorisés, l'humain perçoit son environnement de façon intégrée et ne construit pas de signification à partir d'éléments encodés. On l'a vu, le processus de signification est un coproduit de la perception qui surdétermine le comportement de l'organisme dans son environnement.

C'est pour cela que l'IHM permet d'afforder des comportements, plus ou moins complexes selon les besoins. Mais l'IHM n'engendre pas de comportements de façon déterministe au sens où l'utilisateur pourrait

être programmé pour qu'une configuration d'éléments donnés suscitent l'exact même comportement sans égard aux circonstances.

S'il est possible de spécifier spécifiquement la signification des entrées de la machine, cela s'avère impossible chez l'humain. Cela impose donc de déporter l'effort de conception, de l'interaction sémiotique elle-même, dont on sait qu'elle aura de toute façon lieu, vers les conditions de production de l'interaction.

En tant que fonction du système {humain - machine} intégré, l'interaction sémiotique a valeur de fonction, ce qui implique qu'elle possède, en plus de la signification qu'elle produit, un domaine de stabilité qui est l'ensemble des paramètres du système pour lesquels son produit est acceptable.

À la base de la démarche de conception, il existe donc un ensemble d'exigences incontournables qui ne sont pas liés au bon usage du système mais à son utilisabilité. Cette utilisabilité relève des facteurs humains, c'est à dire des caractéristiques de l'utilisateur mis en œuvre lors de la réalisation d'une tâche¹ ainsi que des facteurs susceptibles de moduler ces caractéristiques².

¹ e.g. La bande passante auditive.

² e.g. La fatigue.

BASTIEN et SCAPIN (1993) ont, sur la base de données expérimentales, fourni un ensemble de critères permettant d'évaluer la manière dont les propriétés d'une interface graphique peuvent conduire à une dégradation de la performance de certaines tâches, lors de l'utilisation d'un système composé d'un écran cathodique, d'un clavier et d'une souris. Le but de ce chapitre est, à partir de la notion d'interaction sémiotique et de l'anthropologie intégrative, d'analyser ces critères ce qui nous permettra d'en abstraire une logique sous-jacente permettant de modéliser abstraitement ce qu'est une IHM ainsi que de généraliser les critères à l'ensemble des systèmes humain(s)-machine(s) en tenant compte des dimensions multimodales de l'interaction.

Il s'agit alors déjà de chercher une manière de modéliser les systèmes humain(s)-machine(s) afin de les rendre biointégrables puisque l'ensemble des exigences fondamentales décrivant le système sont d'ordre biologique puisqu'elles sont liées aux caractéristiques générales de l'être humain. Toutefois, d'un point de vue intégratif, ce lien se fait en s'assurant que le domaine paramétrique des spécifications du système correspond au domaine de stabilité des exigences de l'utilisateur, non seulement d'un

point de vue anthropométrique mais également au point de vue des interactions d'ordre plus élevées comme la perception ou le geste.

4.1 LE FRAMEWORK INTÉGRATIF

4.1.1 CLASSES DE SIGNIFICATIVITÉ

Si l'on considère l'interaction d'un point de vue intégratif, il est nécessaire d'avoir à l'esprit que celle-ci ne se fait jamais entre deux objets isolés, de telle façon qu'il y ait, par exemple, une phalange et un bouton. Il est donc nécessaire de prendre en considération le fait que le doigt fait partie d'un système physiologique et biologique, contenant l'ensemble des entités impliquées dans le phénomène considéré. Il en va de même pour un dispositif technique, en cela qu'un capteur de déplacement comme un bouton ne prend du sens que si l'on considère la partie calculatoire associée.

Dès lors un phénomène est un système en fonctionnement et l'interaction peut donc être considérée de deux façons différentes. Premièrement il y a l'interaction *in vivo* qui s'établit entre deux systèmes réels par l'entremise d'une interaction fonctionnelle. Ensuite il y a l'interaction *in modelo* qui correspond à la formalisation de la première grâce au framework. Cette interaction est une interaction entre fonctions dans la mesure où la fonction est abstraction du fonctionnement. Bien évidemment, de la même manière qu'il n'y a pas d'objet isolé, il n'y a pas de fonction isolée et distinguer un système suffisamment individualisé pour qu'il puisse être considéré comme un objet revient à modéliser un ensemble de fonctions, dépendantes les unes des autres, à travers plusieurs niveaux de hiérarchie organisationnelle.

Ce qui nous intéresse donc pour établir une analyse critique des critères de Scapin et Bastien est donc de formaliser l'interaction entre deux fonctions¹. Cela impose de construire une classification des différents groupes fonctionnels constituant l'humain comme la machine. Un objet quelconque, considéré comme un groupe fonctionnel, sera alors source ou puits de l'interaction et fera partie d'une ou de plusieurs classes de groupes fonctionnels, ce qui permet de les décrire de façon pragmatique. Ainsi, selon la classification décrite dans la figure 4.1, un écran tactile sera

¹ e.g. Pointage, Alarme sonore, ...

à la fois un émetteur visuel et un capteur électrique alors qu'un écran classique ne sera qu'un émetteur visuel.

² Ce que le système est sensé faire.

Ainsi, pour un système technique particulier, il convient de prendre en compte non seulement les dimensions primaires de spécification² mais également les dimensions secondaires, qui comprennent un large ensemble de phénomènes qui résultent de l'activité de ce système. En résulte le besoin de modéliser et de comprendre l'ensemble des paramètres qui entrent en jeu dans la mise en œuvre du système et non seulement ceux qui participent de sa fonction principale.

Pour prendre un exemple simple, nous pouvons considérer le cas de l'interrupteur bistable en électronique. Fonctionnellement, ce système est un composant permettant d'ouvrir et de fermer un circuit électrique et qui se définit par ses deux états possibles, ouvert ou fermé. Plusieurs solutions d'implémentation sont disponibles pour cette fonction, notamment les interrupteurs à levier et les interrupteurs à poussoir, qui sont tous deux des capteurs de déplacement. Ce qui distingue l'interrupteur à levier de celui à poussoir, c'est sa capacité formelle à notifier son état actuel à l'utilisateur en raison du fait que son activation modifie durablement sa forme, alors que le bouton poussoir revient à son état initial. Si tous deux sont donc des capteurs de déplacement, fonctionnant sur le même principe électronique, seul l'un d'entre eux pourra être considéré comme étant un actuateur visuel.

Si l'on cherche à décrire un système, technique ou biologique, non pas en fonction de ses propriétés intrinsèques mais dans l'ensemble de ses relations, il faut donc le faire en fonction de ce qui va avoir un effet sur les autres systèmes que l'on considère. Ainsi l'approche traditionnelle, hiérarchisant fortement les phénomènes attendant à l'évolution d'un système, entre fonctions désirées et sous-produits de ces fonctions, doit être dépassée ici. Ce dépassement sémantique peut se faire à travers une description par des classes de significativité.

On emprunte ici, à l'anglais, le double sens important que possède la notion de *significance*. Si, d'une part, elle recouvre les notions généralement traduites comme ayant trait à la signification, la *significance* peut aussi se traduire par *importance*. La significativité d'une chose, si elle est liée, à sa capacité de signifier, chose importante pour la suite, ne l'est donc que parce que cette chose a un fort impact sur son environnement. Dès

lors, il y a un lien entre décrire la significativité d'une chose et la question centrale de l'épistémologie pragmatique, qui est celle de la définition telle que la pose JAMES (1904b), c'est à dire qu'un concept doit s'analyser en fonction des conséquences pratiques de son existence. La significativité d'une chose est donc, ici, tout ce qui est susceptible d'engendrer de la signification, en cela que c'est une conséquence de l'existence de cette chose.

Il faut toutefois prendre garde à ne pas voir dans la signification une relation passive entre un sujet cognitif et un monde constitué de signes préfabriqués, qu'il s'agirait de décoder convenablement. Ce que l'on entend par signification, ici, est la relation productrice de sens entre un individu et une partie de son environnement. On parle ici de sens pour la raison que le français ne fait pas la distinction anglaise entre *meaning* et *signification*, que tous deux se traduisent par *signification* alors qu'en réalité le premier est le produit du second, entendu comme une relation dynamique.

4.1.2 INTERACTIONS FONCTIONNELLES

AFIN de décrire le fonctionnement d'un système, il est nécessaire d'en décrire les processus internes c'est à dire les interactions fonctionnelles. Celles-ci peuvent être regroupées en trois modes, physique, biologique et logique.

Le mode des interactions physiques (ϕ) regroupe l'ensemble des interactions continues d'ordre physique ou chimique symétriques, celui des interactions biologiques (ψ) regroupe l'ensemble des interaction continues non symétriques et non locales et le mode des interactions logiques (λ) regroupe les interactions locales et discrètes.

Toutefois, ces trois classes primaires d'interaction ne suffisent pas à décrire un système humain-machine de façon satisfaisante dans la mesure où les interactions entre ces deux systèmes peuvent être multimodales. C'est à travers cette multimodalité que se manifeste le caractère fondamentalement asymétrique de l'intégration humain-machine, en raison de la manière même de caractériser les interactions à travers un couple {source,puits} qui sont dans le cas de l'IHM les systèmes décrits dans la figure 4.1.

Humain

- Système perceptif
 - Système visuel
 - Système auditif
 - Système somesthésique
- Effecteur
 - Appareil phonatoire
 - Appareil locomoteur
 - * Posture
 - * Geste
- Constantes physiologiques
 - Système nerveux
 - Rythme cardiaque
 - Température
 - Concentration sanguine
- Appareil socio-technique
 - Entraînement
 - Connaissances
 - Appareil linguistique
 - Système déontique
 - Organisation sociotechnique

Machine

- Capteur
 - Optique
 - Sonore
 - Électrique
 - Thermique
 - Déplacement
- Actuateur
 - Effecteur
 - Emetteur
 - * Visuel
 - * Auditif
 - * Haptique
 - * Thermique
- Calculateur
- Appareil socio-technique
 - Procédures
 - Économie

FIG. 4.1 : Classes de significativité

On définit alors la perception (θ) comme étant l'interaction logique et physique entre la machine et l'humain, alors que l'interaction réciproque sera une interaction logique. De façon similaire, une interaction physique et biologique sera biologique pour le couple {humain,machine} et physique pour le couple {machine,humain}. La raison de cette règle de composition est le fait que l'extension de l'interaction biologique contient celles des interactions physique et logique.

L'asymétrie s'explique par deux raisons différentes. La première est liée à l'asymétrie propre à l'interaction biologique, telle que la définit CHAUVET (1995) tandis que la seconde est liée aux fonctionnements différents des systèmes biologiques et techniques. Ainsi, il est nécessaire de distinguer signal (ϵ) et perception (θ), même si leurs composants sont les mêmes. En effet, pour un être vivant, la perception constitue l'intégration d'une activité biologique par le système nerveux alors que le signal optique capté par la machine est en fait la numérisation d'un ensemble de capteurs dans une matrice. D'un point de vue pragmatique, les deux phénomènes sont donc fondamentalement différents ce qui implique que le sens de l'interaction modifie sa nature.

Le tableau 4.1 référence les modes d'interaction de manière générique. Pour définir la signification particulière d'une interaction il est nécessaire d'instancier le couple {source,puits} à partir des groupes fonctionnels définis dans la figure 4.1.

Il est à noter qu'il n'est pas nécessaire, dans l'absolu, d'instancier un élément humain à un élément machine, dans la mesure où les interactions humain(s)-humain(s) et machine(s)-machine(s) peuvent aussi permettre de décrire le comportement d'un système anthropotechnique et qu'elles se font sur un mode particulier en raison de l'asymétrie des interactions biologiques.

Dès lors la qualification de l'interaction que l'on cherche à spécifier va être déterminée par son mode et la classe des groupes fonctionnels qu'elle met en jeu. Ainsi, une perception visuelle est une interaction physique et logique ($\phi + \lambda$), entre un émetteur optique et un système visuel. Ce que l'on définit ici comme un émetteur optique comprend potentiellement chaque source lumineuse, primaire ou secondaire, de la machine, en cela qu'un émetteur optique est une partie de la machine qui participe à l'établissement du champ optique de l'utilisateur³.

³ Il en va de même pour les émetteurs sonores, thermiques, haptiques, etc...

TAB. 4.1 : Classification des modes d'interaction en fonction du couple {Source,Puits}

Interaction	Couple (source,puits)	Nom
Physique (ϕ)	Humain $\rightleftharpoons$ Machine	Physique (ϕ)
Physique (ϕ)	Humain $\rightleftharpoons$ Humain	Physique (ϕ)
Physique (ϕ)	Machine $\rightleftharpoons$ Machine	Physique (ϕ)
Logique (λ)	H $\rightleftharpoons$ M	Logique (λ)
Logique (λ)	H $\rightleftharpoons$ H	Logique (λ)
Logique (λ)	M $\rightleftharpoons$ M	Logique (λ)
Biologique (ψ)	H $\rightrightarrows$ M	Logique (λ)
Biologique (ψ)	M $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
Biologique (ψ)	H $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
$\phi + \lambda$	H $\rightleftharpoons$ M	Signal (ϵ)
$\phi + \lambda$	M $\rightleftharpoons$ H	Perception (θ)
$\phi + \lambda$	H $\rightleftharpoons$ H	Perception (θ)
$\phi + \lambda$	M $\rightleftharpoons$ M	Signal (ϵ)
$\phi + \psi$	H $\rightrightarrows$ M	Physique (ψ)
$\phi + \psi$	M $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
$\phi + \psi$	H $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
$\psi + \lambda$	H $\rightrightarrows$ M	Signal (ϵ)
$\psi + \lambda$	M $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
$\psi + \lambda$	H $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
$\psi + \lambda + \phi$	H $\rightrightarrows$ M	Constante physiologique (ϵ)
$\psi + \lambda + \phi$	M $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)
$\psi + \lambda + \phi$	H $\rightrightarrows$ H	Biologique (ψ)

4.2 CRITÈRES DE SCAPIN ET BASTIEN (1997)

4.2.1 PRÉSENTATION

LES critères de BASTIEN et SCAPIN (1993) sont directement contemporains de la démocratisation des interfaces graphiques dans le domaine de l'informatique personnelle qui ont démarré avec les travaux sur l'interaction humain(s)-ordinateur(s) de ENGELBART (1962). La grande disponibilité de ces interfaces graphiques a permis à l'outil informatique de se développer et de diversifier ses applications, ce qui a fait de leur conception un enjeu majeur dans la mesure où leur raison d'être est d'améliorer l'utilisabilité du système mais, surtout, de rendre plus performant leur utilisateur.

Ces critères, présentent l'intérêt majeur d'être issus de la recherche expérimentale et sont construits de façon inductive sur cette base. Par conséquent, il sont extrêmement neutres quant à leur ancrage théorique puisqu'ils recherchent le lien entre des faits et leurs conséquences sur l'utilisabilité sans expliquer les raisons profondes de ces liens. Dès lors, cette approche empirique n'est pas susceptible d'être invalidée par l'idéologie du concepteur ce qui garantit l'universalité d'usage des critères.

Les critères de BASTIEN et SCAPIN (1993) ne sont pas un ensemble de règles permettant l'optimalité dans l'usage du système mais il permettent de garantir une efficacité minimale du dispositif. Ainsi, pour deux hypothèses de conception différentes, si toutes deux sont validées par la critériologie, cet outil ne permet pas d'en choisir l'une comme étant "meilleure" que l'autre.

De plus, cette critériologie est établie en faisant en sorte de ne tenir compte que des propriétés de l'IHM évaluée. Elle ne vise alors pas un type d'utilisateur particulier mais, de façon générale, tous les utilisateurs potentiels du système.

C'est pour cela que ces critères sont génériques, car ils n'ont pas pour objet une application particulière de l'outil informatique mais visent à établir une méthodologie d'évaluation de l'utilisabilité que l'on peut considérer comme l'ensemble des exigences fondamentales du système humain(s)-machine(s). Ces exigences sont fondamentales car dans le cas où elles ne seraient pas remplies il ne serait pas envisageable de poursuivre

la conception du système avant d'avoir résolu ce problème. En cela, la critériologie représente un outil de validation majeure des hypothèses de conception puisqu'elle permet la conception détaillée du système.

On voit alors en quoi ces exigences fondamentales sont liées à la possibilité même de la conception de la mise en place d'un couplage humain(s)-machine(s) puisqu'elles permettent de valider les conditions de possibilité de ce couplage. Ainsi, d'un point de vue intégratif, les critères permettent de déterminer explicitement les conditions de viabilité de l'interface qui correspondent aux valeurs que peuvent prendre les spécifications du système⁴ en fonction de ces exigences d'utilisabilité.

⁴ Architecture, Comportement, Évolution.

**

Pour des raisons de commodité de lecture, nous avons choisi de reproduire le texte des critères de BASTIEN et SCAPIN, disponible en français dans leur rapport à l'Inria de 1993, qui apparaîtra au sein de cette section à l'intérieur d'encadrés bleus. Le choix de ces critères par rapport à d'autres heuristiques ou *checklists* comme ceux de MOLICH et NIELSEN (1990), TOGNAZZINI (2003) SHNEIDERMAN (2010) ou BACH et SCAPIN (2003) tient à différentes raisons.

La première de ces raisons est la grande diffusion de cet outil et de son usage courant en ergonomie de conception. Comme nous l'avons déjà affirmé, l'enjeu de notre ergonomie théorique réside dans sa capacité à produire des outils et méthodes améliorant la conception de systèmes anthropotechniques. Il aurait été peu propice de créer de nouvelles formes ou bien de chercher à fabriquer *de novo* une nouvelle critériologie tandis que celles disponibles disposent d'une validation empirique par leur usage courant et par leur genèse.

La deuxième raison qui nous fit choisir cette liste de critères ergonomiques est la manière dont elle a été construite et établie.

Enfin, une troisième raison, quelque peu accessoire mais d'une forte utilité pratique en faveur de ces critères a été la disponibilité en première main de l'un de ses auteurs permettant ainsi un accès précieux aux rationales implicites et au contexte dans lequel cet outil a été établi.

4.2.2 ANALYSE

1. GUIDAGE

Définition

Le *Guidage* est l'ensemble des moyens mis en œuvre pour conseiller, orienter, informer et conduire l'utilisateur lors de ses interactions avec l'ordinateur (messages, alarmes, labels, etc ...), y compris dans ces aspects lexicaux.

Justifications

Un bon guidage facilite l'apprentissage et l'utilisation du système en permettant à l'utilisateur : de savoir, à tout moment, où il se trouve dans une séquence d'interactions, ou dans l'accomplissement d'une tâche ; de connaître les actions permises ainsi que leurs conséquences ; et d'obtenir de l'information supplémentaire (éventuellement sur demande). La facilité d'apprentissage et d'utilisation qui s'ensuivent conduisent à de meilleures performances et occasionnent moins d'erreurs.

La manière de construire ici la notion de guidage est caractéristique du domaine d'application de ces critères, à savoir ce que l'on appellera les interfaces textuelles. Ces interfaces sont couramment utilisées dans l'industrie logicielle ou l'internet et reposent sur un comportement spécifique qui est la lecture. Ainsi, au delà de l'usage du texte écrit dans son sens strict, c'est la manière d'ordonner des objets symboliques en groupes, avec lesquels l'utilisateur va interagir, de façon séquentielle, comme il dirigerait son attention sur l'un ou l'autre des paragraphes qui composent un texte.

Cette manière de construire et d'envisager l'IHM a historiquement été une donnée incontournable du problème du design, en raison des solutions techniques disponibles ainsi que de l'usage des systèmes conçus. En effet, bien qu'il soit, aujourd'hui, affiché sur des dispositifs tactiles permettant la vidéo, un site internet demeure structurellement un texte mis en forme, ce qui oblige l'utilisateur à le considérer comme tel.

Le critère *Guidage* repose sur une notion qui est celle de complémentarité dans l'exécution de la tâche. En IHM classique, l'on considère que l'utilisateur doit effectuer une tâche et la machine est alors considérée comme ustensile adjuvant à cet ensemble d'actions. Les exemples les plus classiques de cela se trouvent dans la gestion de données⁵. Dans cette

⁵ e.g. Remplissage d'une base de données lors de l'inscription sur une plateforme internet

⁶ Diminuer autant que possible les erreurs.

⁷ Minimiser le temps d'exécution de la tâche.

⁸ e.g. GPS

⁹ e.g. Moniteur médical

classe de tâches, le guidage s'évalue en fonction du gain qualitatif⁶ et quantitatif⁷.

Avec les systèmes interactifs immergés dans l'action, le guidage s'évalue en fonction de l'aide à l'action. Ici, l'interface a pour fonction de permettre à l'utilisateur d'explorer l'espace des actions possibles, afin de déterminer la bonne conduite à tenir⁸ ou d'avertir d'une déviation dans les conditions d'usage⁹. Ainsi, le système technique a alors pour rôle de suppléer l'humain dans des sous tâches, autrement réalisables mais avec une performance et/ou une moindre fiabilité.

Si l'on se place dans une perspective post-cognitiviste et intégrative, le guidage cesse d'être une composante symbolique de l'interaction pour se complexifier dans le sens d'une coaction. Il y a toujours une complémentarité dans l'exécution de la tâche, mais cette dernière devient multilatérale. Le cas échéant, le guidage comprendra bien les moyens mis en œuvre pour orienter l'action de l'utilisateur mais il peut également comprendre les solutions mises en place pour que la machine puisse, elle-même, explorer l'espace des possibles, en fonction du comportement de l'utilisateur, mais également en fonction du contexte d'usage.

Le guidage est un critère essentiellement qualitatif dans la mesure où il fait intervenir différents critères fondamentaux. Tout agencement d'objet dans l'espace est incitatif et les significations qu'il va prendre seront à la fois dépendantes des conditions d'usage du système ainsi que de l'utilisateur qui vont s'entre-influencer¹⁰.

¹⁰ e.g. Un utilisateur peut pour une raison quelconque mal utiliser le système et ainsi créer une situation d'urgence qui peut elle-même résulter en un état de stress.

(a) INCITATION

Définition

Le terme *Incitation* a ici une définition plus large que celle qu'on lui confère généralement. Ce critère recouvre les moyens mis en œuvre pour amener les utilisateurs à effectuer des actions spécifiques, qu'il s'agisse d'entrée de données ou autre. Ce critère englobe aussi tous les mécanismes ou moyens faisant connaître aux utilisateurs les alternatives, lorsque plusieurs actions sont possibles, selon les états ou contextes dans lesquels ils se trouvent. L'*Incitation* concerne également les informations permettant aux utilisateurs de savoir où ils en sont, d'identifier l'état ou le contexte dans lequel ils se trouvent, de même que les outils d'aide et leur accessibilité.

Une bonne incitation guide les utilisateurs et leur évite par exemple d'avoir à apprendre une série de commandes. Elle permet aussi aux utilisateurs de savoir quel est le mode ou l'état en cours, où ils se trouvent dans le dialogue et ce qu'ils ont fait pour s'y trouver. Une bonne incitation facilite donc la navigation dans une application et permet d'éviter les erreurs.

La notion d'incitation contient une difficulté importante qui a trait à sa proximité sémantique avec la notion d'*affordance* telle que l'utilise NORMAN (1988). Après GIBSON (1977), on considère l'affordance comme la résultante de la mise en situation d'un animal au sein d'un environnement. De cette mise en situation, va s'établir un accord entre les besoins de l'animal et certaines propriétés sensorielles de l'environnement perçu, ce qui va conduire à des possibilités d'action. Ce que l'on appelle *affordance* c'est ce phénomène, et, c'est en cela que l'on considère par extension qu'un objet, comme parcelle de l'environnement sensoriel, *afforde* quelque chose. D'un strict point de vue conceptuel, un objet isolé n'afforde rien, mais, comme il est une partie du système de l'environnement, ses propriétés sont susceptibles d'en modifier les *affordances*, ce qui rend cet objet significatif¹¹.

¹¹ Pour un ensemble de conditions déterminées.

La cause des disputes concernant l'affordance réside dans son rapport à la signification. À ce sujet, deux analyses sont possibles selon que l'on considère la signification comme étant ou non intrinsèque à l'objet qui *afforde*. Cette différence de statut tient à la considération de la signification comme phénomène statique ou dynamique.

On peut considérer l'affordance comme une propriété nominale statique de l'objet. Cela revient à considérer ce dernier comme un signe, c'est à dire quelque chose qui désigne un concept. Dès lors ce que représente l'objet en termes d'affordances c'est la dénotation du concept que l'on lie à cet objet, à savoir l'ensemble des actions possibles vis à vis de lui. Se pose alors la question difficile de savoir si cette dénotation est un ensemble fini. Cette approche s'inspire des idées posées par FREGE (1892) d'une manière qui est en réalité assez métaphorique. En effet, la recherche de Frege et de la linguistique se pose dans le cadre du langage, qui est une structure formelle particulière, qui dispose d'un vocabulaire et d'une grammaire. On trouve des dictionnaires ou des lexiques aussi tôt que l'on remonte dans l'histoire humaine¹² et leur rôle est d'un intérêt pratique majeur, en cela qu'il permet de fixer par convention la dénotation des

¹² Ce que rappelle BOULANGER (2003).

mots que l'on utilise, et, donc de la rendre finie. Dès lors, sans lexique, la dénotation reste ouverte, c'est à dire que le nombre de significations virtuelles que l'on peut faire s'actualiser dans un signe est indéterminée, ce qui est problématique. Il n'y a pas de dictionnaire des objets, leur dénotation, est restreinte par l'éducation, mais, n'est jamais rendue finie par elle. Alors, poser que l'affordance est une propriété de l'objet revient à assumer qu'un objet n'a pas de signification en soi.

De plus, comme on l'a vu, dire qu'un objet affine revient en fait à affirmer qu'il surdétermine la relation entre l'animal et l'environnement, pour un ensemble de conditions données. Il n'y a jamais d'objets isolés, l'environnement n'est donc pas une juxtaposition de dénnotations indéterminées mais un système dynamique, qui engendre sa propre signification, à travers de ce que l'on appelle situation. La signification des parties de l'environnement est donc, dans cette approche dynamique, nécessairement dépendante de la situation. Dès lors il n'y a plus à chercher à comprendre comment se manifestent d'éventuelles "affordances perçues" puisque l'environnement affine toujours quelque chose.

L'IHM, en tant que composante de l'environnement, joue alors un rôle primordial dans l'établissement de la situation en cela que c'est elle qui a pour fonction de la structurer. En analysant la question de cette manière, on perçoit alors aisément comment sont organisés les différents objets de l'interface et de quelle manière ils influent sur l'affordance.

GIBSON (1961) pose les bases de ce que l'on appelle l'*optique écologique*, à partir du grec οἶκος¹³ et λογία¹⁴, qui fournissent la notion d'une science du lieu de vie. Par souci de clarté, on réservera ce terme à la psychologie gibsonienne et l'on parlera plutôt de mésologie au sein d'une pensée intégrative. La raison principale est que le grec μέσος traduit littéralement le terme de milieu ce qui a fourni la traduction de la notion uexküllienne d'*Umweltlehre* qui recoupe mieux ce qui serait une connaissance de l'environnement, considéré comme déterminant de l'*être au monde* propre d'une espèce. De plus, l'existence actuelle de l'écologie politique amène bien souvent à des contresens et des problèmes sur la définition technique de la notion d'écologie.

Ainsi, ce que cherche à faire GIBSON (1961) est de « de définir le stimulus potentiel d'un système oculaire, c'est à dire les caractères spécifiques du flux électromagnétique dans le milieu transparent environnant (eau ou air) qui permettent aux animaux de voir les objets. ». De là

¹³ Maison

¹⁴ Étude scientifique

s'ensuit la théorie des affordances, également chez GIBSON (1977, 1979) qui sont des modes d'interactions potentielles, entre un individu et son environnement, et qui permettent de décrire comment certaines parties de cet environnement, dans un contexte donné, peuvent être considérées comme des incitations à l'action.

Dans le vocabulaire du design, le terme d'affordance a pris différentes significations. Sous l'influence de NORMAN (1988), s'est développé ce que l'on pourrait appeler la thèse du réalisme des affordances, qui distingue affordances perçues et affordances non perçues, faisant dès lors de l'affordance une propriété interne des objets, équivalente à une signification essentielle. Dès lors suivant cette thèse, designer c'est fabriquer des affordances potentielles qui seront actualisées, si elles sont correctement produites, pour résumer l'affordance est une signification.

Dans une optique mésologique, l'affordance est une signifiante¹⁵ plutôt qu'une signification. Designer ne relève alors pas d'une injection de sens dans l'objet mais de la mise en place des conditions d'une production extemporanée de signification. Par conséquent il faut, suivant la linguistique, distinguer des éléments atomiques et des éléments complexes que l'on appelle schèmes affordanciels.

Il n'y a pas d'affordance qui ne soit pas perçue, en cela que toute perception est significative¹⁶ c'est à dire constituée de signification. L'affordance est donc l'interaction entre les propriétés formelles de l'objet perçu et le sujet, considéré dans son entièreté¹⁷. Dès lors, il est possible de déterminer empiriquement comment la conjonction de certaines formes, certains "états d'esprit" et certains contextes va amener à signifier la même chose, pour tous les utilisateurs. De plus, la dimension nécessairement sociotechnique de la signifiante permet de moduler ces comportements à travers l'apprentissage.

Dès lors, si on la comprend en termes d'affordances, l'incitation s'évalue selon la capacité du système à engendrer de façon stable l'interaction sensorimotrice désirée, dans un contexte déterminé, et, le domaine de stabilité d'une affordance correspond alors aux circonstances dans lesquelles la signification émerge de l'interaction, de façon prédictible.

L'incitation a donc une valeur qualitative qui est fonction de la procédure à laquelle participe l'élément d'interface considéré. Elle possède une dimension négative, en cela qu'il est nécessaire de considérer les tendances spontanées des utilisateurs, afin d'éviter des signifiants intempestifs, c'est à dire le fait, pour un élément d'interface, de tendre

¹⁵ Au sens défini par BENVENISTE (1963) comme émergence du sens chez le récepteur.

¹⁶ Dans le cas contraire elle est aperception.

¹⁷ Physiologique, Emotionnel, Culturel, etc...

à prendre une signification différente de celle voulue, dans un contexte donné.

Ce critère est un critère sémiotique qualitatif, par conséquent, il va être issu d'interactions sensorielles visuelles, auditives et tactiles et être fonction de la forme des éléments d'interface ainsi que de leur architecture spatiale et temporelle, qui participe à la forme du niveau hiérarchique supérieur. Son évaluation pour un élément d'interface donné se fait en égard à une fonction déterminée et, principalement, par rapport à la capacité de cet élément à signifier¹⁸ sa participation à l'accomplissement de cette fonction. De façon similaire, l'incitation sera mauvaise si un élément d'interface tend à signifier de façon erronée sa participation à une fonction dans laquelle il n'intervient pas.

¹⁸ Activement ou passivement.

(b) GROUPEMENT/DISTINCTION ENTRE ITEMS

Définition

Le critère *Groupement/Distinction entre Items* concerne l'organisation visuelle des items d'information les uns par rapport aux autres. Ce critère prend en compte la topologie (localisation) et certaines caractéristiques graphiques (format) afin d'illustrer les relations entre les divers items affichés, leur appartenance à une même classe, ou encore dans le but de montrer la distinction entre différentes classes d'items. Ce critère concerne aussi l'organisation des items à l'intérieur d'une même classe.

Justifications

La compréhension d'un écran dépend, entre autres, choses, de l'arrangement, du positionnement et de la distinction des objets (images, textes, commandes, etc ...) qui y sont présentés. Les utilisateurs auront plus de facilité à repérer les items et/ou groupes d'items et à connaître leurs liens si ils sont présentés de façon organisée (ex. : alphabétiques, fréquence d'utilisation, etc ...) d'une part, et si ces items ou groupes d'items sont présentés dans des formats ou codages qui permettent d'illustrer leurs similitudes ou leurs différences d'autre part. De même, les utilisateurs pourront mieux les apprendre et s'en rappeler. Le groupement/distinction entre items entraîne un meilleur guidage.

Une interface est la structuration d'objets, en vue de générer certains comportements, de façon stéréotypée. Il a donc deux aspects à prendre en compte ici. D'un point de vue qualitatif, il faut s'assurer qu'un objet précis, dans une configuration donnée, soit capable de signifier ce que l'on veut

lui faire signifier. De façon complémentaire, une dimension quantitative apparaît, dans l'importance de cette signification, dans la hiérarchie des interactions, en fonction de priorités liées à la tâche considérée. Ainsi la manière de structurer une interface est donnée fondamentale du problème ,car la relation sémiotique qui fonde l'incitation ne fait jamais isolément de l'ensemble des champs sensoriels.

C'est en cela que les schèmes affordanciels sont importants car ce sont les unités de base de l'interaction ce qui impose de leur donner la bonne structure interne mais également un arrangement efficace.

Le critère *Réticulations*¹⁹ concerne comment les éléments d'interactions du système sont organisés en réseaux sémiotiques multimodaux. De bonnes réticulations permettent de faciliter la compréhension des liens entre les significations de différents objets et ainsi de faciliter celle de l'interface dans son ensemble.

¹⁹ On emprunte le terme à la chimie moléculaire où il désigne le phénomène de formation d'un polymère par création d'un réseau tridimensionnel entre ses composants.

i. GROUPEMENT/DISTINCTION PAR LA LOCALISATION

Définition

Le critère *Groupeement/Distinction par la localisation* concerne le positionnement des items les uns par rapport aux autres dans le but d'indiquer leur appartenance ou non-appartenance à une même classe, ou encore dans le but de montrer la distinction entre différentes classes. Ce critère concerne aussi l'organisation des items dans une même classe.

Justifications

La compréhension d'un écran dépend, entre autres choses, de l'arrangement des objets (images, textes, commandes, etc...) qui y sont présentés. Les utilisateurs auront plus de facilité à repérer les différents items si ils sont présentés de façon organisée (ex. : alphabétique, fréquence d'utilisation, etc...). De même, ils pourront mieux les apprendre et s'en rappeler. Le critère groupement/distinction par la localisation entraîne un meilleur guidage.

Intégration

Ce critère est lié à l'interaction entre les éléments de structure et la forme de l'IHM, ce qui en fait un critère d'architecture. Les paramètres permettant de l'évaluer sont les positions de chacun des éléments de structure, c'est à dire la géométrie spatiale du système ainsi que les fonctions auxquelles participent les éléments.

Ce critère est très lié à la dimension textuelle des IHM étudiées ici. Ce qui est sous entendu est l'existence d'un élément basal à toute interface qui est l'écran. Un écran est essentiellement une portion du champ visuel, ce qui en fait un objet unimodal et limite la portée du critère à tout ce qui se comporte comme un écran ,comme un tableau de bord automobile. L'importance de ces groupements par la localisation est qu'elle permet d'évaluer la structure de certains groupes d'objets qui participent au guidage. Il s'agit donc ici de contribuer à réduire la dénotation de certains objets, à partir d'un ensemble de règles d'agencement simples comme le regroupement géographique des objets, en relation avec une fonction particulière .

On s'intéresse ici à la structure interne des schèmes affordanciels. Une réticulation analogique efficace permet de donner la bonne probabilité d'apparition des affordances désirées. La réticulation se fait donc en relation à une tâche déterminée, c'est à dire à une fonction du système humain(s)-machine(s) complet, en faisant en sorte que les objets qui n'interviennent pas dans cette tâche soient moins susceptibles d'entrer en interaction que ceux qui y sont importants.

Pour cela, il est possible de construire la topologie des objets en fonction de la tâche²⁰ mais il faut également prendre en compte la temporalité inhérente à la tâche, dans la mesure où un objet important en début de tâche peut devenir inutile une fois celle-ci en cours de réalisation.

Ce critère concerne la manière dont un ensemble de schèmes affordanciels sont intégrés au sein d'une structure de signification à travers leurs propriétés fonctionnelles. Ainsi, il convient d'établir une topologie et une chronologie des différents éléments d'interface, liés à une tâche, afin que la signification de chaque item pour cette action soit explicite et compréhensible.

On considère comme analogues deux ou plusieurs éléments d'interface qui participent à la même fonction, par exemple les touches alphabétiques d'un clavier sont analogues.

Les schèmes affordanciels produisent des ensembles d'interactions complexes dans la mesure où les propriétés formelles à un niveau n déterminent celle d'un niveau $n + 1$. La signification d'un objet n'étant pas intrinsèque dans la mesure où il n'y a pas d'objet isolé, designer, en plus de contraindre les affordances possibles, nécessite d'établir une intentionnalité, ce qui correspond à l'établissement d'une structure

²⁰ Groupement simple.

liée aux actions nécessaires à l'établissement d'une tâche, donc à leur participation à une fonction.

Il est donc nécessaire que cette propriété fonctionnelle des éléments d'interface soit comprise par l'utilisateur à travers l'architecture spatio-temporelle de l'interface.

Il convient donc qu'elles aient une forme qui exprime cette analogie. Toutefois, cette forme a une signification très dépendante au contexte, pour un objet simple, ce qui implique qu'il soit nécessaire de regrouper les objets analogues, afin de pouvoir signifier leur participation à une fonction commune. De la même manière, il est important de séparer les objets non analogues, qui ne participent pas à une même fonction, sans quoi l'on risque de créer de l'ambiguïté et des erreurs de compréhension.

Le regroupement d'objets ne suffit pas à engendrer suffisamment de signification pour parvenir à un guidage satisfaisant. Il est nécessaire de construire une architecture, pour cela, dans la mesure où l'analogie n'implique pas l'interchangeabilité. Cette architecture ainsi que les comportements propres des éléments d'interface à un niveau n vont engendrer la forme de l'élément d'interface de niveau $n + 1$ et donc participer à son incitation et son guidage.

Ce critère est donc qualitatif dans l'espace et dans le temps et résulte d'interactions visuelles, tactiles et auditives. Il est directement conditionné par le critère *compatibilité physiologique* en cela que l'architecture d'un élément d'interface complexe doit être conçue en accord avec les capacités d'action et de perception de l'utilisateur. Par exemple pour un clavier, le fait que les touches soient regroupées et assemblées dans un espace rectangulaire ne suffit pas, si la distance entre chaque touche est trop importante l'efficacité d'utilisation diminue et si elle est trop courte le nombre de fautes de frappe risque d'augmenter.

ii. GROUPEMENT/DISTINCTION PAR LE FORMAT

Définition

Le critère *Groupement/Distinction par le Format* concerne particulièrement les caractéristiques graphiques (format, couleur, etc...) permettant de faire apparaître l'appartenance ou la non-appartenance d'items à une même classe, ou encore permettant d'indiquer des distinctions entre classes ou bien encore des distinctions entre items d'une même classe.

Justifications

Les utilisateurs auront plus de facilité à connaître les liens entre items ou classes d'items si des formats, ou codages permettent d'illustrer leur similitudes ou leurs différences. De tels liens seront ainsi mieux appris et mieux rappelés. Un bon groupement/distinction par le format entraîne un meilleur guidage.

Intégration

Ce critère est lié à la forme des éléments de structure en lien avec la fonction auxquels ils participent.
Les paramètres permettant de l'évaluer sont la forme des éléments de structure, c'est à dire leur géométrie et leur dynamique ainsi que les fonctions auxquelles ils participent.

Ce troisième critère vise à juger d'une autre manière de réduire la taille de la dénotation des objets d'interface en codant leurs propriétés formelles. Ce codage se fait à partir de conventions et de données physiologiques, en vue de signaler le rôle d'un objet dans l'accomplissement d'une fonction ou bien de distinguer plus avant deux objets participant à des fonctions différentes.

Ce critère concerne l'architecture d'une ensemble de schèmes affordanciers, à travers les propriétés formelles de leurs éléments susciteurs, qui sont les éléments d'interface, plus ou moins complexes, supposés engendrer une interaction d'ordre comportemental précise dans un contexte donné.

On appelle homologues deux ou plusieurs objets qui possèdent une même forme mais qui ne participent pas nécessairement à la même fonction

Les dimensions d'apprentissage et d'anticipation liées à l'utilisation d'un objet technique imposent de classer et choisir les schèmes affordanciers que l'on souhaite associer à certaines classes d'intentionnalités.

Il est problématique que deux schèmes affordanciers identiques participent à plusieurs classes d'intentionnalité, car cela engendre de la confusion. De même, multiplier les schèmes liés à une même classe d'intentionnalité est source d'erreur.

La réticulation homologique correspond donc à un lien fort entre les propriétés formelles d'un objet et la fonction que cet objet est censé remplir.

(c) FEEDBACK IMMÉDIAT

Définition

Le *Feedback Immédiat* concerne les réponses de l'ordinateur consécutives aux actions des utilisateurs, lesquelles peuvent être le simple appui sur une touche ou l'entrée d'une séquence de commandes. Dans tous les cas, l'ordinateur doit répondre, dans les plus brefs délais, avec un délai de réponse approprié et homogène selon les types de transactions. Dans tous les cas, une réponse aussi immédiate que possible doit être fournie à l'utilisateur le renseignant sur l'action accomplie et son résultat.

Justifications

La qualité et la rapidité du feedback sont deux facteurs importants pour l'établissement de la confiance et de la satisfaction des utilisateurs ainsi que pour leur compréhension du dialogue. Ces facteurs permettent aux utilisateurs de se faire une bonne représentation du fonctionnement du système. L'absence de feedback ou des délais trop importants entre les actions utilisateur et le feedback, peuvent déconcerter les utilisateurs, ce qui augmente les chances que les utilisateurs entreprennent des actions qui risquent d'entraver les transactions en cours.

Intégration

Ce critère renvoie à la dynamique d'un élément de structure. Les paramètres permettant de l'évaluer sont la dynamique d'un élément de structure et la fonction à laquelle il est associé.

En ce qui concerne le feedback deux dimensions sont à considérer. D'une part la dimension de qualité, qui reprend les autres éléments du guidage, et d'autre part la dimension de rapidité, permettant à l'utilisateur de demeurer dans une interaction propice à un bon guidage. Cette dimension temporelle est liée au changement de situation, attendu par

l'utilisateur, à l'occasion d'une action. Lorsque ce changement de situation n'a pas lieu, soit à travers l'IHM soit à travers le comportement du système, le comportement attendu de l'utilisateur risque de changer, en cela qu'il peut être conduit à effectuer d'autres actions afin de susciter un changement de situation.

Renvoie à un cas particulier d'incitation qui correspond à la construction d'un ensemble d'affordances en relation avec les éléments antérieurs déterminant l'état actuel du système.

(d) LISIBILITÉ

Définition

Le critère *Lisibilité* concerne les caractéristiques lexicales de présentation des informations sur l'écran pouvant entraver ou faciliter la lecture de ces informations (luminance des caractères, contraste caractères fond, dimension des lettres, espacement des mots, espacement entre les lignes, espacement entre les paragraphes, longueur des lignes, etc...). Par convention, le critère *Lisibilité* ne concerne ni le feedback ni les messages d'erreur.

Justifications

La performance est accrue lorsque la présentation des informations à l'écran tient compte des caractéristiques cognitives et perceptives des utilisateurs. Une bonne lisibilité facilite la lecture des informations présentées. Ainsi par exemple, les lettres sombres sur fond clair sont plus faciles à lire que l'inverse ; le texte présenté en lettres majuscules et minuscules est lu plus rapidement que le texte présenté seulement en lettres majuscules.

La lisibilité est ici considérée comme la propriété principale des éléments textuels de l'interface, et non pas comme une propriété générale de celle-ci. Cela tient à une assomption qui est celle de la différence cognitive, existant entre le texte et les autres éléments de l'IHM, en cela que le texte serait lu alors que les autres éléments seraient reconnus. Ainsi, la lisibilité est à distinguer de la compatibilité puisque elle ne touche pas les propriétés d'un objet mais d'un groupe d'objet qui est central dans les dispositifs numériques analysés ici puisque c'est lui qui a pour fonction de véhiculer la majorité des informations essentiels à l'utilisation du système.

Cette manière de distinguer les classes d'éléments d'interface est importante à prendre en compte ici, dans la mesure où c'est elle qui

rend délicat l'usage d'une liste de critères entre deux types d'interface différents. Un exercice interprétatif est alors nécessaire à qui veut effectuer cette démarche, à l'instar de BACH et SCAPIN (2003) qui ont adapté cette liste aux environnements virtuels. Ce critère montre donc bien l'une des problématiques importantes qui nous concerne, en vue de la construction d'une révision, et qui est celle de l'abstraction, si l'on veut que l'outil soit adapté à un grand nombre d'applications il est nécessaire de se séparer des idiotismes propres à certaines.

Ainsi, les cockpits aéronautiques sont sujet à des problèmes de lisibilité, bien qu'ils soient composés de peu de texte, et que celui ci ne soit pas le porteur principal d'informations du système. Cela nous incite donc à reconsidérer la lisibilité comme un cas particulier de compatibilité fortement lié à l'incitation et aux groupements.

Intégration.

La lisibilité est liée à la dynamique et la forme des éléments de structure de l'interface.

Les paramètres qui permettent d'évaluer ce critère sont la forme et la dynamique des éléments de structure qui composent un message et la géométrie de ce message.

La lisibilité doit se comprendre en relation avec l'incitation et la compatibilité. Elle contribue à déterminer les bornes de la zone de stabilité des schèmes affordanciers mis en place car elle désigne la capacité formelle des schèmes affordanciers à générer des interactions dans une catégorie déterminée et des circonstances précises.

2. CHARGE DE TRAVAIL

Définition

Le critère *Charge de Travail* concerne l'ensemble des éléments de l'interface qui ont un rôle dans la réduction de la charge perceptive ou mnésique des utilisateurs et dans l'augmentation de l'efficacité du dialogue.

Justifications

Plus la charge de travail est élevée, plus grands sont les risques d'erreurs. De même, moins l'utilisateur sera distrait par des informations non pertinentes, plus il pourra effectuer sa tâche efficacement. Par ailleurs, plus les actions requises seront courtes, plus rapides seront les interactions.

La notion de charge de travail est délicate à envisager car elle est définie de façon fondamentalement différente selon les approches. Ici, le concept est lié à la notion de capacité attentionnelle et à la complexité de l'IHM.

(a) BRIÈVETÉ

Définition

Le critère *Brièveté* concerne la charge de travail au niveau perceptif et mnésique à la fois pour des éléments individuels d'entrée ou de sortie et les séquences d'entrées (i.e, les suites d'actions nécessaires à l'atteinte d'un but, à l'accomplissement d'une tâche). Il s'agit ici de limiter autant que possible le travail de lecture, d'entrée et les étapes par lesquelles doivent passer les utilisateurs.

Justifications

Les capacités de la mémoire à court terme sont limitées. Par conséquent, plus courtes sont les entrées, plus limités sont les risques d'erreur. Par ailleurs, plus succins sont les items, plus court est le temps de lecture. Aussi, plus les actions nécessaires à l'atteinte d'un but sont nombreuses et compliquées, plus la charge de travail augmente et par conséquent plus les risques d'erreur sont élevés.

La brièveté repose sur la concision et les actions minimales. Ces deux critères ont pour but d'analyser et de juger quantitativement dans quelle

mesure l'IHM facilite ou entrave la réalisation d'une tâche en lien avec la charge de travail. La brièveté repose sur une recherche d'équilibre entre des actions plus ou moins complexes et leur nombre. Une action peut être réalisée par l'entrée d'un grand nombre de lignes de commandes complexes, ce qui rend la tâche longue et complexe. La même tâche peut parfois être automatisée sous forme d'un script déclenché par un bouton unique ce qui la rend alors concise et brève.

Dès lors les éléments d'une IHM se trouvent toujours sur un spectre entre ces deux extrêmes dans la mesure où les nécessités réelles de contrôle sur le déroulement de l'action tendent à réduire fortement la brièveté.

i. CONCISION

Définition

Le critère *Concision* concerne la charge de travail au niveau perceptif et mnésique pour ce qui est des éléments individuels d'entrée ou de sortie. Par convention, la *Concision* ne concerne pas le feedback ni les messages d'erreurs.

Justifications

Les capacités de la mémoire à court terme sont limitées. Par conséquent, plus courtes sont les entrées, plus limités sont les risques d'erreur. Par ailleurs, plus succincts sont les items, plus court est le temps de lecture.

Intégration

La concision est liée à la dynamique et les éléments de structure permettant la réalisation d'une tâche.
Le paramètre qui permet d'évaluer ce critère est la forme de l'élément de structure.

Le critère *Concision* concerne la quantité de travail nécessaire à l'établissement d'une interaction et donc, par extension, celle nécessaire à l'effectuation d'une tâche. On parle ici de quantité de travail en analogie avec la Mécanique dans sa relation avec la notion de puissance nécessaire à l'effectuation d'une action.

Une tâche réalisée de façon concise limite la probabilité d'erreurs intermédiaires mais réduit d'autant le contrôle de l'utilisateur sur le système.

ii. ACTIONS MINIMALES

Définition

Le critère *Actions Minimales* concerne la charge de travail quand aux actions nécessaires à l'atteinte d'un but, à l'accomplissement d'une tâche. Il s'agit ici de limiter autant que possible les étapes par lesquelles doivent passer les utilisateurs.

Justifications

Plus les actions nécessaires à l'atteinte d'un but sont nombreuses et compliquées, plus la charge de travail augmente et par conséquent plus les risques d'erreur sont élevés.

Intégration

Ce critère est lié aux différentes interactions nécessaires à la réalisation d'une tâche. Il est donc lié aux éléments de structure et à leur dynamique. Le paramètre qui permet d'évaluer ce critère est l'évolution du système qui est issue des dynamiques propres liées aux fonctions qui la composent.

Ce critère concerne l'architecture des interactions, nécessaires à l'accomplissement d'une tâche, ainsi que leur nombre. Il peut être considéré comme un second ordre de *Concision* dans la mesure où la quantité de travail des interactions doit être ici considérée sous l'angle de leur compositionnalité²¹ et de la multimodalité.

Ce critère est à mettre en balance avec la concision, dans la mesure où certaines configurations permettent de réaliser une fonction complète, à partir d'une seule action excessivement simple²² alors que d'autres nécessitent de réaliser action unique très compliquée²³

²¹ Ainsi il peut être quantitativement équivalent de réaliser une tâche avec peu d'étapes compliquées ou avec beaucoup d'étapes simples.

²² e.g. Un interrupteur bistable permet généralement d'allumer plusieurs luminaires dans une pièce.

²³ e.g. Une ligne de commande nécessitant un grand nombre de paramètres et une syntaxe particulière.

(b) DENSITÉ INFORMATIONNELLE

Définition

Le critère *Densité Informationnelle* concerne la charge de travail du point de vue perceptif et mnésique, pour des ensembles d'éléments et non pour des items.

Justifications

Dans la plupart des tâches, la performance des utilisateurs est influencées négativement quand la charge informationnelle est trop élevée ou trop faible. La probabilité d'erreur augmente. Il faut donc supprimer les éléments sans lien avec la tâche en cours. Il faut aussi éviter à l'utilisateur la mémorisation de longues et nombreuses informations ou procédures (la mémoire à court terme est limitée), ou toute activité nécessitant de sa part la mise en œuvre d'activités cognitives complexes lorsque la tâche ne le requiert pas.

Intégration

Ce critère est lié à la forme de l'interface et aux éléments de structure qui la composent pour produire son architecture. Les paramètres qui permettent de l'évaluer sont les éléments de structure associés à des fonctions du système ainsi que la dynamique de ces éléments et la géométrie par laquelle ils sont organisés.

Ce critère est relatif à la saturation de signification de tout ou partie de l'interface, il renvoie en fait à la complexité dans le cadre spécifique des interfaces à forte composante textuelle.

L'écran est un espace limité, ainsi dans cet espace le nombre d'éléments à analyser est primordial. Plus ceux ci sont nombreux, plus l'utilisateur va devoir les analyser afin d'en valider ou non la pertinence pour la tâche en cours. De plus, cette analyse n'est pas sans erreur possible. Limiter le nombre d'éléments d'interface ne participant pas à la tâche en cours permet donc de limiter le risque d'erreur en augmentant la brièveté de la tâche en cours.

3. CONTRÔLE EXPLICITE

Définition

Le critère *Contrôle Explicite* concerne à la fois la prise en compte par le système des actions explicites des utilisateurs et le contrôle qu'ont les utilisateurs sur le traitement de leurs actions.

Justifications

Quand les entrées des utilisateurs sont explicitement définies par eux-mêmes et sous leur contrôle, les ambiguïtés et les erreurs sont limitées. De plus, le contrôle qu'ont les utilisateurs sur le dialogue est un facteur d'acceptation du système.

(a) ACTIONS EXPLICITES

Définition

Le critère *Actions Explicites* concerne la relation pouvant exister entre le fonctionnement de l'application et les actions des utilisateurs. Cette relation doit être explicite, c'est à dire que le système doit exécuter seulement les opérations demandées par l'utilisateur et pas d'autres et ce, au moment où il les demande.

Justifications

Quand les opérations du système résultent des actions des utilisateurs, on observe moins d'erreurs et la compréhension du fonctionnement de l'application est facilitée.

Intégration

Ce critère est lié aux éléments de structure et à la dynamique qui composent son évolution. Les paramètres qui permettent d'évaluer ce critère sont le lien entre des éléments de structure et certaines fonctions du système ainsi que la dynamique qui régit ces éléments.

Ce critère concerne la réciprocité et la compréhensibilité de la relation humain-machine. Ce que l'on appelle relation est ici l'ensemble des interactions en jeu dans l'accomplissement des tâches prévues par le système et doit donc être considéré comme couplage de plus haut niveau.

Cette dimension explicite des actions du système technique est importante, car elle permet la stabilité dans la compréhension sémantique

de l'interface. Celle-ci se base sur un apprentissage et donc sur un raisonnement inductif de la part de l'utilisateur. Si cette induction n'est pas stable au cours de l'utilisation et entre plusieurs utilisations différentes, il sera plus difficile à l'utilisateur de pouvoir associer une fonction du système à l'un de ses comportements.

(b) CONTRÔLE UTILISATEUR

Définition

Par *Contrôle Utilisateur* on entend ici le fait que l'utilisateur doit toujours avoir la main, pouvoir contrôler le déroulement (ex. : interrompre, reprendre) des traitements informatiques en cours. Ses actions devraient être anticipées et des options appropriées fournies pour chaque cas.

Justifications

Quand l'utilisateur a le contrôle du dialogue, les réactions de ce dernier sont prévisibles. L'apprentissage s'en trouve facilité et le risque d'erreurs diminué.

Intégration

Ce critère est lié aux éléments de structure et à la dynamique qui composent son évolution. Les paramètres qui permettent d'évaluer ce critère sont le lien entre des éléments de structure et certaines fonctions du système ainsi que la dynamique qui régit ces éléments.

Ce critère concerne la capacité que le système possède, dans certaines conditions, de modifier son activité en cours à l'initiative de l'utilisateur qui est considéré comme régulateur de la relation humain-machine.

Le *contrôle utilisateur* est le corollaire du *feedback*. Si l'utilisateur doit pouvoir, à tout moment, connaître l'état du système, il est important qu'il puisse agir sur lui sans avoir à recourir à des moyens détournés. Le contrôle du dialogue est ici essentiellement un contrôle sur le déroulement d'une tâche logicielle, c'est à dire le passage d'une étape à une autre.

4. ADAPTABILITÉ

Définition

L'adaptabilité d'un système concerne sa capacité à réagir selon le contexte, et selon les besoins et préférences des utilisateurs.

Justifications

Plus les façons d'effectuer une même tâche sont diverses, plus les chances que l'utilisateur puisse choisir et maîtriser l'une d'entre elles, au cours de ses apprentissages, sont importantes. Il faut donc fournir à l'utilisateur des procédures, options et commandes différentes leur permettant d'atteindre un même objectif. Par ailleurs, une interface ne peut convenir à la fois à tous ses utilisateurs potentiels. Pour qu'elle n'ait pas d'effet négatifs sur l'utilisateur, cette interface doit, selon les contextes, s'adapter à l'utilisateur.

(a) FLEXIBILITÉ

Définition

Le critère *Flexibilité* concerne les moyen mise à la disposition des utilisateurs pour personnaliser l'interface afin de rendre compte de leurs stratégies ou habitudes de travail et des exigences de la tâche. Le critère *Flexibilité* correspond aussi au nombre de façons différentes mises à la disposition des utilisateurs pour atteindre un objectif donné. Il s'agit en d'autres termes de la capacité de l'interface à s'adapter à des actions variées des utilisateurs.

Justifications

Plus les façons d'effectuer une même tâche sont diverses, plus les chances que l'utilisateur puisse choisir et maîtriser l'une d'entre elles, au cours de ses apprentissages, sont importantes.

Intégration

Ce critère n'a pas directement de dimension intégrative.

Ce critère correspond à la capacité du système à moduler certaines interactions en fonction des paramètres de l'utilisateur, que ceux ci soient physiologiques, sémiotiques, physiques, etc...ou de la situation. En

réalisant certaines fonctions de différentes manières, il est possible de faire en sorte que le système puisse traiter un plus grand nombre d'usages particuliers qu'avec des fonctions unifinales ce qui limite le recours aux usages détournée, source d'erreurs de la part de l'utilisateur.

(b) PRISE EN COMPTE DE L'EXPÉRIENCE DE L'UTILISATEUR

Définition

Le critère *Prise en Compte de l'Expérience de l'Utilisateur* concerne les moyens mis en œuvre pour respecter le niveau d'expérience de l'utilisateur.

Justifications

Des utilisateurs expérimentés n'ont pas toujours les mêmes besoins informationnels que les novices. Il peut être souhaitable de fournir aux utilisateurs inexpérimentés des transactions très guidées, au pas-à-pas. Pour des utilisateurs expérimentés, des dialogues à la seule initiative de l'ordinateur peuvent les ennuyer et ralentir leurs interactions ; par contre, des raccourcis peuvent permettre d'accéder plus rapidement aux fonctions du système. Des moyens différenciés doivent donc être prévus pour tenir compte de ces variations du niveau d'expérience. Cependant, l'expérience des utilisateurs peut varier. Les utilisateurs peuvent devenir plus experts à force d'utilisation, ou moins experts après de longues périodes de non-utilisation. L'interface doit aussi être conçue afin de tenir compte de ces variations du niveau d'expérience.

Ce critère correspond à un second ordre de flexibilité lié aux aspects sociotechniques de l'utilisateur et à la capacité du système à prendre en charge la variabilité interutilisateurs.

Ce critère est une donnée importante de l'ergonomie logicielle, dans la mesure où le produit de celle-ci est généralement destiné à un public hétérogène. Cette hétérogénéité peut recouvrir une dimension d'expertise et, dans ce cas, disposer d'une équifinalité des fonctions du système permet de moduler des facteurs comme la brièveté et de paramétrer la flexibilité du logiciel.

5. GESTION DES ERREURS

Définition

Le critère *Gestion des Erreurs* concerne tous les moyens permettant d'une part d'éviter ou de réduire les erreurs, et d'autre part de les corriger lorsqu'elles surviennent. Les erreurs sont ici considérées comme des saisies de données incorrectes, des saisies dans des formats inadéquats, des saisies de commande avec une syntaxe incorrecte, etc...

Justifications

Les interruptions provoquées par les erreurs ont des conséquences négatives sur l'activité des utilisateurs. De manière générale, elles rallongent les transactions et perturbent la planification. Plus les erreurs sont limitées, moins il y a d'interruptions au cours de la réalisation d'une tâche et meilleure est la performance.

Ce critère constitue les moyens pour la machine d'évaluer la consistance des interactions afin d'éviter toute action incontrôlée.

(a) PROTECTION CONTRE LES ERREURS

Définition

Le critère *Protection Contre les Erreurs* concerne les moyens mis en place pour délester et prévenir les erreurs d'entrées de données ou de commandes ou les actions aux conséquences néfastes.

Justifications

Il est préférable de détecter les erreurs lors de la saisie plutôt que lors de la validation : ceci évite de perturber la planification.

Intégration

Ce critère est lié à la dynamique et la forme de l'IHM ce qui en fait un critère comportemental.

Ce critère recouvre un grand nombre de mesures prises par le concepteur afin que le système puisse fonctionner, malgré d'éventuelles erreurs en les empêchant de devenir des entrées. Un exemple typique de ce genre de mesure est la limitation du type de données acceptable pour un formulaire ; si le formulaire est lié à une fonction qui nécessite un nombre

entier pour être correctement remplie, il faut empêcher l'utilisateur d'y entrer des caractères alphabétiques et lui notifier son erreur par un message.

(b) *QUALITÉ DES MESSAGES D'ERREUR*

Définition

Le critère *Qualité des Messages d'Erreur* concerne la pertinence, la facilité de lecture et l'exactitude de l'information donnée aux utilisateurs sur la nature des erreurs commises (syntaxe, format, etc...) et sur les actions à entreprendre pour les corriger.

Justifications

La qualité des messages favorise l'apprentissage du système en indiquant aux utilisateurs les raisons ou la nature de leurs erreurs et en leur indiquant ce qu'il faut ou ce qu'ils auraient dû faire.

Ce critère est un cas particulier de *Feedback*, relatif à des comportements inattendus du système et surtout sa capacité à notifier ces comportements, de manière sûre et adéquate. Des messages d'erreur de bonne qualité doivent permettre d'aboutir à une résolution de l'erreur mais doivent surtout ne pas contribuer à diminuer la stabilité du système, par la création de nouvelles erreurs ou l'amplification des erreurs existantes.

(c) *CORRECTION DES ERREURS*

Définition

Le critère *Correction des Erreurs* concerne les moyens mis à la disposition des utilisateurs pour leur permettre de corriger leurs erreurs.

Justifications

Les erreurs sont d'autant moins perturbatrices qu'elles sont faciles à corriger.

Ce critère concerne la résilience du système face aux erreurs, c'est à dire sa capacité à adopter des comportements propres à les rectifier. Cela s'accompagne généralement d'une bonne information quant à la source de l'erreur détectée et à la procédure à suivre pour la corriger.

6. HOMOGÉNÉITÉ/COHÉRENCE

Définition

Le critère *Homogénéité/Cohérence* se réfère à la façon avec laquelle les choix de conception de l'interface (codes, dénominations, formats, procédures, etc...) sont conservés pour des contextes identiques, et sont différents pour des contextes différents.

Justifications

Les procédures, labels, commandes, etc., sont d'autant mieux reconnus, localisés et utilisés, que leur format, localisation, ou syntaxe sont stables d'un écran à l'autre, d'une session à l'autre. Dans ces conditions le système est d'avantage prévisible et les apprentissages plus généralisables; les erreurs sont réduites. Le manque d'homogénéité peut augmenter considérablement le temps de recherche. Le manque d'homogénéité est aussi une raison importante du refus d'utilisation.

Intégration

Ce critère est lié aux dimensions formelles et dynamique de l'IHM ce qui en fait un critère comportemental. Les paramètres qui permettent de l'évaluer sont la forme des éléments de structure considérés et les fonctions auxquelles ils sont associés.

L'apprentissage d'un système se fait par induction, c'est à dire que l'utilisateur associe l'un de ses comportements à certaines fonctions du système ainsi qu'à certains de ses éléments. Ainsi, il est attendu que pour toute action donnée sur un élément d'interface donné, le système se comporte de façon prévisible ce qui constitue la signification de cet élément.

7. SIGNIFIANCE DES CODES ET DÉNOMINATIONS

Définition

Le critère *Signifiante des Codes et Dénominations* concerne l'adéquation entre l'objet ou l'information affichée ou entrée, et son référent. Des codes et dénominations "signifiants" disposent d'une relation sémantique forte avec leur référent.

Justifications

Lorsque le codage est signifiant, le raper et la reconnaissance sont meilleurs. De plus, des codes et dénominations non significatifs pour les utilisateurs peuvent leur suggérer des opération inappropriées et ainsi conduire à des erreurs.

Ce critère renvoie à l'adéquation entre les aspects sociotechniques de certains éléments et la culture dans laquelle s'intègre l'utilisateur. Il s'agit en fait d'un cas particulier de l'homogénéité, élargi à l'ensemble de la culture de l'utilisateur.

Intégration

Ce critère est lié au choix des éléments de structure de l'interface en fonction de la signification que le concepteur souhaite leur attribuer.

8. COMPATIBILITÉ

Définition

Le critère *Compatibilité* se réfère à l'accord pouvant exister entre les caractéristiques des utilisateurs (mémoire, perceptions, habitudes, compétences, âge, attentes, etc...) et des tâches, d'une part, et l'organisation des sorties, des entrées et du dialogue d'une application donnée, d'autre part. De plus la *Compatibilité* concerne également le degré de similitude entre divers environnements ou applications.

Justifications

Le transfert d'information d'un contexte à un autre est d'autant plus rapide et efficace que le volume d'information à recoder par l'utilisateur est réduit. L'efficacité est accrue lorsque : les procédures nécessaires à l'accomplissement de la tâche sont compatibles avec les caractéristiques psychologiques des utilisateurs ; les procédures et les tâches sont organisées de manière à respecter les attentes, ou habitudes des utilisateurs ; les traductions, les transpositions, les interprétations, ou références à la documentation sont minimisées. Les performances sont meilleurs lorsque l'information est présentée sous une forme directement utilisable.

Intégration

Ce critère est lié au choix des choix d'interaction de l'interface en fonction de la signification que le concepteur souhaite mettre en place.

Certains éléments d'un système particulier peuvent être retrouvés dans un autre système et, si leur signification diverge, cela tend à induire une incompréhension de la part de l'utilisateur et ainsi rend plus difficile l'apprentissage, cela fait de la compatibilité un équivalent externe à la signification des codes.

D'autre part, c'est à travers ce critère que sont jugés ce que l'on nomme les aspects d'accessibilité, définis par la norme *ISO/IEC 40500 :2012. Technologies de l'information – Règles pour l'accessibilité des contenus Web (WCAG) 2.0* (2012), qui constituent un ensemble de bonnes pratiques, permettant un accès facilité aux publics en situation de handicap. On peut concevoir une partie de ces handicaps comme une limitation de la bande passante sensorielle de l'utilisateur résultant ainsi par une moindre perception du contraste que la normale.

Conjointement, la compatibilité a pour but de prendre en charge certaines situations d'usage spécifiques qui vont modifier les conditions d'utilisation du système²⁴ et parfois le rendre plus difficile à utiliser de façon pleinement satisfaisante.

²⁴ e.g. En intérieur ou en extérieur.

4.2.3 ASPECTS INTÉGRATIFS DE LA CRITÉRIOLOGIE

En explicitant chacun des critères élémentaires de BASTIEN et SCAPIN (1993), il est possible d'établir une analyse intégrative des critères sur la base du tableau 4.2 (page 191). Il faut ici avoir à l'esprit qu'un élément d'interface donné sera toujours décrit sur la base de tous les éléments du cadre de conception intégratif mais certaines dimensions prennent une importance plus importante dans l'évaluation de certains critères. Ce tableau permet d'établir la cartographie décrite dans la figure 4.2 (page 192).

Le critère *Guidage* permet d'évaluer les aspects relatifs aux conditions de l'interaction sémiotique considérée comme un type particulier d'affordance. Les deux critères de *Groupe* ont trait à la forme et à l'architecture de l'IHM selon le niveau de structure hiérarchique de l'élément considéré. Le *Feedback immédiat* permet d'évaluer comment l'IHM manifeste l'influence de l'opérateur sur le système c'est à dire en évaluant la dynamique des interactions. Enfin la *Lisibilité* permet d'évaluer comment l'évolution du système, c'est à dire les paramètres des

TAB. 4.2 : Paramètres intégratif permettant l'analyse d'une IHM

Critère	Paramètre	Aspects intégratifs
Groupement/Distinction par la localisation	Géométrie	Forme + Éléments de structure
Groupement/Distinction par le format	Forme	Forme
Feedback immédiat	Dynamique de la forme	Dynamique
Lisibilité	Domaine de stabilité des sens de l'opérateur	Évolution
Concision	Complexité de la tâche	Forme + Dynamique
Actions minimales	Nombre de d'événements nécessaire à la réalisation d'une tâche	Évolution
Densité informationnelle	Nombre d'éléments en interaction en fonction de la tâche en cours	Éléments de structure + Dynamique
Actions explicites	Éléments de sortie de l'interface en lien avec une fonction interne du système	Éléments de structure
Contrôle utilisateur	Éléments d'entrée de l'interface en lien avec une fonction interne du système	Éléments de structure
Flexibilité	Existence de différents groupes d'éléments d'interfaces liés à une tâche	
Prise en compte de l'UX	Existence de différentes séquences de tâches liées à une tâche	
Protection contre les erreurs	Comportement des éléments d'entrée	Forme + Dynamique
Qualité des messages d'erreur	Forme des messages	Forme
Correction des erreurs	Forme des entrées	Forme
Homogénéité/Cohérence	Choix des éléments de structure de l'interface	Forme
Signifiante des codes et dénominations	Choix des éléments de structure de l'interface	Forme
Compatibilité	Choix des éléments de structure de l'interface	Éléments de structure + Dynamique

fonctions qui le décrivent, va influencer la capacité de l'opérateur à établir un couplage sémiotique de qualité suffisante.

Si l'on considère comme exemple le critère *Charge de travail*, celui-ci se compose des critères *Concision*, *Actions minimales* et *Densité informationnelle*. Si l'on suit la figure 4.2 (page 192), ce critère sera donc déterminé par la forme, l'évolution et la dynamique du système. Ce critère est également influencé par la géométrie du système, son comportement

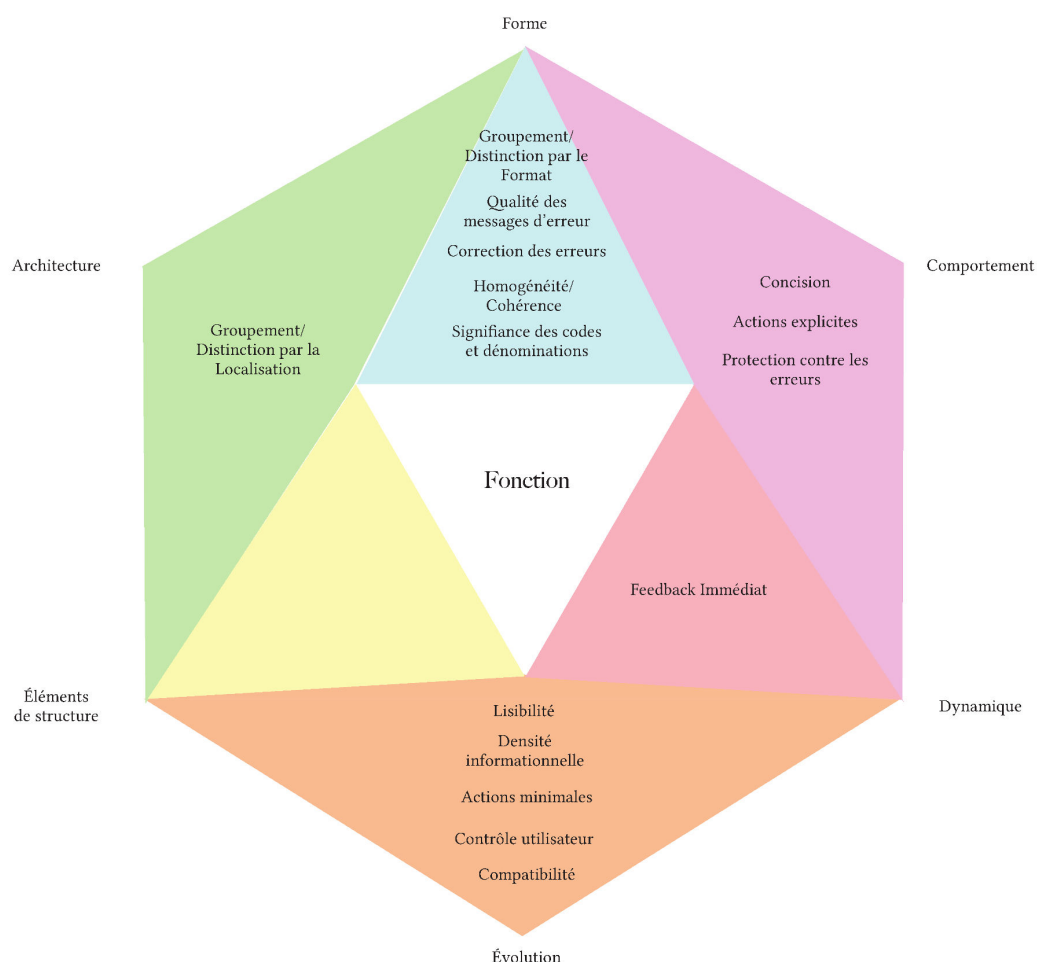


FIG. 4.2 : Liens entre la critériologie de BASTIEN et SCAPIN (1993) et le cadre de conception de FASS (2012) : en jaune, rouge et bleu sont répertoriés les critères qui privilégient les spécifications du système tandis qu'en vert, violet et orange sont répertoriés ceux qui privilégient les exigences de celui-ci.

et son évolution, ce qui lie la *Charge de travail* à l'ensemble des critères de BASTIEN et SCAPIN (1993).

Ainsi, de la même manière, la formalisation logique de la charge de travail se résume avec les trois formules suivantes²⁵ :

²⁵ Voir p. 204.

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \forall cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \vdash \sum W(i, f) \leq \tau \quad (5.17)$$

$$\forall cf \subseteq \mathcal{I} \wedge \exists i \in \mathcal{I} \wedge i \in cf \wedge t = (fa, fb, \dots, fz) \wedge t \subseteq f \vdash (z - a) \leq \tau \quad (5.18)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathcal{F} \wedge \exists cf \subseteq \mathcal{I} \vdash \#cf - \#\mathcal{I}cf \leq \tau \wedge \tau \geq 0 \quad (5.19)$$

Dès lors la charge de travail d'une tâche complexe s'évalue en fonction de la somme des charges de travail de ses composantes, du nombre de celles ci ainsi que de la dynamique générale de l'IHM. Comme on le voit dans la figure 5.1 (page 208), il existe une interrelation des différents facteurs déterminant un critère ergonomique en particulier. Ainsi, l'évaluation de la charge de travail se fait également en prenant en compte les aspects formels et l'évolution du système qui vont permettre le calcul de t ou $W(i, f)$.

Comme nous le verrons, ces aspects sont importants lorsque l'on cherche à établir une modélisation ontologique de l'IHM.

Le critère *Adaptabilité* n'a pas de dimension intégrative dans la mesure où celle ce critère spécifie l'existence de différentes manières de réaliser une même fonction du système. Cela tient au fait que lorsque différentes alternatives existent, celles-ci seront prises en charge par les autres critères qui détermineront leur utilisabilité.

Le critère *Gestion des erreurs* renvoie à des aspects essentiellement formels de l'IHM dans la mesure où la *Qualité des messages d'erreur* renvoie à une dimension purement formelle et non esthétique. Dès lors, *Protection contre les erreurs* et *Correction des erreurs* renvoient tous deux à la propension de l'IHM d'accepter ou non, en entrée, certains comportements de l'utilisateur ce qui est un critère formel.

Les critères *Homogénéité/Cohérence* et *Signifiante des codes* sont profondément liés aux éléments formels de l'IHM et, en particulier, au choix de ceux-ci par le concepteur. Ils ne renvoient donc pas à des propriétés de l'IHM elle même mais à des choix de conception liés à une *économie symbolique* limitant volontairement l'usage d'objets très différents afin de créer la même signification.

Enfin, le critère *Compatibilité* renvoie peut être conçu comme une version plus large de la lisibilité. Ce critère est lié de manière fondamentale à l'évolution du système en cela que la compatibilité évalue la propension des interactions dans le système à ne pas sortir de leur domaine de stabilité.

CHAPITRE 5

Proposition pour une critériologie

DANS le cas des critères de BASTIEN et SCAPIN (1993) se pose la problématique du champ d'application de l'outil et de sa pertinence malgré les évolutions des dispositifs permettant l'interaction humain(s)-machine(s). En effet, les systèmes sur lesquels les critères ont été conçus sont des ordinateurs dotés d'écrans cathodiques, d'un clavier et d'une souris. Le clavier et la souris n'ont pas vu d'évolution drastique au cours des années mais l'écran, à lui seul, pose la question de l'ancrage des critères dans un type de systèmes donné. Plus encore, la démocratisation de l'informatique portable a substitué le *trackpad* à la souris tandis que l'informatique mobile a généralisé les écrans tactiles de tailles variées, tout en permettant le développement de solutions techniques d'interaction humain(s)-machine(s) permettant de développer de nouvelles formes d'interactions ou, au moins, de modifier les formes déjà bien connues.

En tant qu'outil d'évaluation ergonomique, les critères ne sont pas à comprendre comme une méthode permettant, à partir d'un ensemble désordonné d'objets, d'obtenir mécaniquement une interface optimale. Leur mise en œuvre va grandement dépendre du rapport qu'entretient le concepteur avec eux et avec sa pratique. Dès lors, certains sont susceptibles d'adapter les critères aux spécificités des projets qu'ils rencontrent.

La critériologie proposée ici n'a pas pour ambition de détruire et remplacer celle de BASTIEN et SCAPIN (1993) puisqu'elle se fonde

directement dessus. Son but est d'élargir le champ d'application de la critériologie existante à tous les objets techniques.

De plus, cette nouvelle critériologie se propose de fonder ce que nous appelons une *ontologie de conception*, c'est à dire un modèle générique du système humain(s)-machine(s) à partir des principes de l'anthropologie intégrative de la première partie et des critères eux-mêmes. Pour ce faire, nous avons choisi de mettre en évidence et de formaliser la logique sous-jacente de la critériologie afin d'obtenir un ensemble de définitions permettant de décrire un système humain(s)-machine(s) de façon abstraite et générique ainsi qu'un ensemble de règles, issues des critères.

5.1 RATIONALES

CETTE nouvelle liste de critères ergonomiques est établie en vue d'une application à un plus grand nombre de systèmes anthropotechniques que les critères de BASTIEN et SCAPIN (1993) qui visent principalement les systèmes informatiques faisant usage d'un écran. La dimension sémiotique importante pour la modélisation de l'interaction humain-machine n'est pas explicite à l'origine ce qui n'est pas problématique dans un contexte d'informatique générale mais qui peut le devenir dès lors que le système que l'on conçoit repose sur la multimodalité ou une grande complexité. Cela impose de rendre la stabilité sémiotique de l'interface explicite lors de son évaluation.

Ce nouveau critère de *Stabilité sémiotique* remplace *Signification des codes/ dénominations* et possède un rôle similaire. Il intègre les critères *Homogénéité / Cohérence* et *Gestion des erreurs* dans la mesure où le premier a pour ambition de rendre l'interface plus lisible et le second de rendre les erreurs moins handicapantes pour la réalisation de la tâche. Il est donc plus large mais vise à évaluer comment, au cours de l'usage, un élément donné de l'IHM conserve la signification voulue par le concepteur.

Le critère *Guidage*, correspond désormais à l'évaluation de la manière dont l'interface va informer l'utilisateur de l'état du système et de ses possibilités d'action. Ainsi, dans une optique intégrative, un message d'erreur n'est pas différent d'une autre information sur l'état du système comme l'indication de l'avancée de la tâche en cours. Dès lors le critère

Qualité des messages d'erreur peut être dissout dans le critère *Activité explicite*. De la même manière, le critère *Feedback immédiat* se trouve lui aussi dissout dans *Activité explicite* dans la mesure où le feedback ne doit pas être dissocié du reste de l'IHM mais une fonction de guidage à part entière. Le critère *Incitation* devient un critère *Affordance* afin de souligner plus avant la dimension écologique du guidage par l'IHM dans la mesure où l'utilisateur n'a jamais à faire avec des éléments isolés de celle-ci mais toujours à un ensemble d'entre eux qui constitue une partie de ses champs sensoriels. Le critère *Activité explicite* remplace *Actions explicites* et prend un double sens. D'une part il permet d'évaluer la capacité du système à renseigner l'utilisateur sur son état actuel et d'autre part il évalue la capacité du système à renforcer l'association entre un comportement de l'utilisateur et un comportement du système permettant ainsi d'établir des stratégies d'utilisation et l'acquisition de l'expertise avec l'expérience.

Le *Contrôle explicite* devient un critère de haut niveau en intégrant la *Correction des erreurs* et la *Flexibilité*. Ce nouveau critère évalue la capacité du système à prendre en compte l'activité de l'utilisateur, que celle-ci soit, dans une certaine mesure, prévue ou non dans le cas de la *Flexibilité* ou bien que ce soit lors de la sortie d'un état d'erreur du système.

Le critère *Charge de travail* qui permet d'évaluer les contre-mesures liées à l'organisation et à la dynamique de l'interface reste inchangé dans la mesure où il a trait à l'ensemble des autres critères et où sa formulation ne pose pas de problème particulier dans un cadre intégratif.

Enfin, le critère *Compatibilité* intègre désormais les critères *Lisibilité* et *Prise en charge de l'expérience utilisateur*. Cette version élargie du critère vis désormais à prendre en charge l'éventuelle variabilité contextuelle relative à l'IHM comme la diversité des profils d'utilisateurs ou bien leurs caractéristiques physiologiques et/ou anatomiques.

5.2 DÉFINITIONS

$\mathcal{I}$ est l'ensemble des objets i qui composent le système humain machine.

$$\mathcal{I} = \{i_n | n \in \mathbb{N}^+\} \quad (5.1)$$

$\mathfrak{F}s$ et $\mathfrak{F}h$ sont respectivement l'ensemble des fonctions de la machine f_n et de celles de l'opérateur ψ_n . Les fonctions de la machine se divisent en fonctions de l'interface $\mathfrak{F}si$ et fonctions cachées à l'opérateur $\mathfrak{F}sc$. On distingue, dans $\mathfrak{F}si$, les entrées $\mathfrak{F}sii$ et les sorties $\mathfrak{F}sio$.

La fonction $\alpha(i, f)$ exprime la participation d'un objet i à une fonction quelconque de $\mathfrak{F}$. Elle permet de définir les classes fonctionnelles cf et $c\psi$ qui sont des sous ensembles de $\mathcal{I}$.

$$\mathfrak{F}s = \{f_n | n \in \mathbb{N}^+\} \quad (5.2a)$$

$$\mathfrak{F}h = \{\psi_n | n \in \mathbb{N}^+\} \quad (5.2b)$$

$$\mathfrak{F} = \mathfrak{F}h \cup \mathfrak{F}s \wedge \mathfrak{F}h = \mathbb{C}_{\mathfrak{F}} \mathfrak{F}s \quad (5.2c)$$

$$\mathfrak{F}s = \mathfrak{F}si \cup \mathfrak{F}sc \wedge \mathfrak{F}si = \mathbb{C}_{\mathfrak{F}s} \mathfrak{F}sc \quad (5.2d)$$

$$\mathfrak{F}si = \mathfrak{F}sii \cup \mathfrak{F}sio \wedge \mathfrak{F}sii = \mathbb{C}_{\mathfrak{F}si} \mathfrak{F}sio \quad (5.2e)$$

$$\forall i \subseteq \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathfrak{F} \wedge \alpha(i, f) \vdash \exists cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \quad (5.2f)$$

$$\forall i \subseteq \mathcal{I} \wedge \exists \psi \in \mathfrak{F} \wedge \alpha(i, \psi) \vdash \exists c\psi \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in c\psi \quad (5.2g)$$

La fonction $\gamma(f, \mathcal{D}_f)$ exprime le lien entre une fonction f ou ψ de $\mathfrak{F}$ et un domaine fonctionnel $\mathcal{D}_f$ ou $\mathcal{D}_\psi$. $\mathcal{D}_f$ contient un domaine paramétrique $\mathcal{D}p_f$ et un domaine de stabilité $\mathcal{D}s_f$. Le domaine paramétrique est l'ensemble des valeurs potentielles des paramètres de f et le domaine de stabilité correspond à l'ensemble des valeurs de paramètres possibles pour lesquels

f produit un résultat satisfaisant.

$$\forall f \in \mathfrak{F} \wedge \exists \mathcal{D}s_f \in \mathcal{D} \wedge \exists \mathcal{D}p_f \in \mathcal{D} \vdash \forall x \in \mathcal{D}p_f \Rightarrow \exists y \in \mathcal{D}s_f \wedge x = y \quad (5.3a)$$

$$\forall \psi \in \mathfrak{F} \wedge \exists \mathcal{D}s_\psi \in \mathcal{D} \wedge \exists \mathcal{D}p_\psi \in \mathcal{D} \vdash \forall x \in \mathcal{D}p_\psi \Rightarrow \exists y \in \mathcal{D}s_\psi \wedge x = y \quad (5.3b)$$

Tout objet i de $\mathcal{I}$ possède des coordonnées sphériques $\mathcal{P}_i$, qui font partie du domaine paramétrique des fonctions auxquelles participe i . $\mathcal{P}_i$ s'exprime dans un référentiel centré sur le centre de gravité de la tête de l'opérateur et dont l'axe vertical correspond à l'intersection du plan frontal et du plan sagittal.

$$\forall i \in \mathcal{I} \vdash \exists \mathcal{P}_i \wedge \mathcal{P}_i = (\rho_i, \Theta_i, \phi_i) \quad (5.4a)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathfrak{F} \wedge i \in cf \vdash \mathcal{P}_i \in \mathcal{D}p_f \quad (5.4b)$$

$\mathfrak{G}$ est l'ensemble des formes de base g permettant de décrire les éléments de $\mathcal{I}$.

La fonction $\beta(i, g)$ exprime la relation d'un objet à un paramètre esthétique (forme, couleur, etc...). Elle permet de définir les classes formelles cg qui sont des sous ensembles de $\mathcal{I}$.

$$\mathfrak{G} = \{g_n | n \in \mathbb{N}^+\} \quad (5.5a)$$

$$\forall i \subseteq \mathcal{I} \wedge \exists g \subseteq \mathfrak{G} \wedge \beta(i, g) \vdash \exists cg \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cg \quad (5.5b)$$

$$\forall g \in \mathfrak{G} \wedge \forall \mathcal{D} \in \mathfrak{D} \wedge \delta(g, \mathcal{D}) \vdash \exists \mathcal{D}p_g \in \mathfrak{D} \wedge \exists \mathcal{D}s_g \in \mathfrak{D} \quad (5.5c)$$

Tout élément i du système se caractérise par l'intersection d'une classe fonctionnelle cf et d'une classe formelle cg .

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathcal{F} \wedge \exists g \in \mathcal{G} \wedge \alpha(i, f) \wedge \beta(i, g) \vdash i = cf \cap cg \quad (5.6)$$

La fonction $W(i, f)$ exprime le coût d'utilisation d'un élément i du système en regard à une fonction déterminée. Cette fonction qui est un paramètre de f est corrélée au coût d'utilisation des classes fonctionnelles $w(cf)$ et formelles $w(cg)$ auxquelles il appartient.

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \wedge i \in cg \vdash W : i \mapsto w(cf) * w(cg) \quad (5.7a)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathcal{F} \wedge i \in cf \vdash W(i, f) \in \mathcal{D}p_f \quad (5.7b)$$

t désigne une tâche, c'est à dire une suite ordonnée de fonction f de $\mathcal{F}$ liées à un objet i de $\mathcal{I}$.

$$\begin{aligned} & \forall cf \subseteq \mathcal{I} \wedge \exists i \in \mathcal{I} \wedge i \in cf \\ & \vdash \exists t \in \mathcal{F} \wedge t = (f_0, f_1, \dots, f_z) \wedge \forall f \in t \wedge \exists x \in i \wedge \alpha(x, f) \end{aligned} \quad (5.8)$$

$\mathfrak{K}$ désigne un contexte. On distingue contextes humains $\mathfrak{Kh}$ et contextes systèmes $\mathfrak{Ks}$ qui correspondent aux ensembles de paramètres $\mathcal{D}p_f^{k_n}$ pour une fonction f de $\mathcal{F}$. La fonction $\varepsilon(k, \mathcal{D}_f)$ exprime le lien entre un contexte

donné et un domaine paramétrique de la fonction f .

$$\mathfrak{Ks} = \{ks_n | n \in \mathbb{N}+\} \quad (5.9a)$$

$$\mathfrak{Kh} = \{kh_n | n \in \mathbb{N}+\} \quad (5.9b)$$

$$\mathfrak{K} = \mathfrak{Ks} \cup \mathfrak{Kh} \wedge \mathfrak{Ks} = \mathbb{C}_{\mathfrak{K}} \mathfrak{Ks} \quad (5.9c)$$

$$\mathcal{D}p_f = \{\mathcal{D}p_f^{ks_n} | n \in \mathbb{N}+ \wedge ks \in \mathfrak{Ks}\} \quad (5.9d)$$

$$\mathcal{D}p_\psi = \{\mathcal{D}p_\psi^{kh_n} | n \in \mathbb{N}+ \wedge kh \in \mathfrak{Kh}\} \quad (5.9e)$$

$$\forall k \in \mathfrak{K} \wedge \forall f \in \mathfrak{F} \wedge \exists \mathcal{D}_f \in \mathfrak{D} \wedge \varepsilon(k, \mathcal{D}_f) \vdash \exists \mathcal{D}p_f^k \in \mathfrak{D} \quad (5.9f)$$

5.3 CRITÉRIOLOGIE

1. GUIDAGE

Le Guidage est l'ensemble des moyens mis en œuvre, au sein de l'interface, pour conseiller, orienter, informer et conduire l'utilisateur lors de ses interactions avec le système (messages, alarmes, labels, etc ...), y compris dans ces aspects lexicaux.

(a) AFFORDANCE

Ce critère recouvre les moyens mis en œuvre pour amener les utilisateur à effectuer des actions spécifiques dans un contexte donné. Ce critère englobe aussi tous les mécanismes ou moyens faisant connaître aux utilisateurs les alternatives, lorsque plusieurs actions sont possibles, selon les états ou contextes dans lesquels ils se trouvent.

(b) ACTIVITÉ EXPLICITE

Pour toute fonction d'entrée f de l'interface correspond une fonction de sortie f' .

$$\forall f \in \mathfrak{Fsc} \wedge \exists i \in \mathfrak{I} \vdash \exists f' \in \mathfrak{Fsi} \wedge i \in cf \wedge i \in cf' \quad (5.10)$$

Le critère Activité Explicite concerne la relation pouvant exister entre le fonctionnement du système et les actions des utilisateurs. Cette relation doit être explicite, c'est à dire que le système doit exécuter seulement les opérations demandées par l'utilisateur et pas d'autres et ce, au moment où il les demande. Les actions explicites concernent également les informations permettant aux utilisateurs de savoir où ils en sont, d'identifier l'état ou le contexte dans lequel ils se trouvent, de même que les outils d'aide et leur accessibilité. D'autre part ce critère évalue

la capacité de l'IHM à renvoyer à l'utilisateur une compréhension de ses actions en termes d'impact sur l'évolution du système.

(c) RÉTICULATIONS

Le critère Groupement/Distinction entre Items concerne l'organisation visuelle des items d'information les uns par rapport aux autres. Ce critère prend en compte la topologie (localisation) et certaines caractéristiques graphiques (format) afin d'illustrer les relations entre les divers items affichés, leur appartenance à une même classe, ou encore dans le but de montrer la distinction entre différentes classes d'items. Ce critère concerne aussi l'organisation des items à l'intérieur d'une même classe.

i. RÉTICULATION ANALOGIQUE

Pour trois objets i, j et k de $\mathcal{I}$, si k ne participe pas à la même fonction f que i et j alors ces derniers seront plus proches entre eux que de lui.

$$\begin{aligned} \exists(i \wedge j \wedge k) \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathcal{F} \wedge \exists cf \subseteq \mathcal{I} \wedge (i \wedge j \wedge \neg k) \in cf \\ \vdash 0 < \|\vec{ij}\| < (\|\vec{ik}\| \vee \|\vec{jk}\|) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Ce critère concerne le positionnement des items les uns par rapport aux autres dans le but d'indiquer leur appartenance ou non-appartenance à une même classe, ou encore dans le but de montrer la distinction entre différentes classes. Ce critère concerne aussi l'organisation des items dans une même classe.

ii. RÉTICULATION HOMOLOGIQUE

Tout objet i de $\mathcal{I}$, s'il participe à une fonction, possède une forme et inversement.

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathcal{F} \wedge \exists cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \vdash \exists g \in \mathcal{G} \wedge \exists cg \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cg \quad (5.12a)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists g \in \mathcal{G} \wedge \exists cg \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cg \vdash \exists f \in \mathcal{F} \wedge \exists cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \quad (5.12b)$$

Deux objets i et j de $\mathcal{I}$ qui ont la même forme participe à la même fonction.

$$\begin{aligned} \exists g \in \mathcal{G} \wedge \forall (i \wedge j) \in \mathcal{I} \wedge \exists cg \subseteq \mathcal{I} \wedge (i \wedge j) \in cg \\ \vdash \exists cf \subseteq \mathcal{I} \wedge (i \wedge j) \in cf \end{aligned} \quad (5.13)$$

Deux objet i et j de $\mathcal{I}$ qui ne participent pas à une fonction commune n'ont pas la même forme

$$\begin{aligned} \forall (i \wedge j) \in \mathcal{I} \wedge \exists g \in \mathcal{G} \wedge \exists (cg \wedge cf) \subseteq \mathcal{I} \\ \wedge (i \wedge \neg j) \in cf \wedge i \in cg \vdash \neg j \in cg \end{aligned} \quad (5.14a)$$

Ce critère concerne particulièrement les caractéristiques graphiques (format, couleur, etc...) permettant de faire apparaître l'appartenance ou la non-appartenance d'items à une même classe, ou encore permettant d'indiquer des distinctions entre classes ou bien encore des distinctions entre items d'une même classe.

2. CONTRÔLE EXPLICITE

Pour toute fonction f du système, il doit exister un élément i d'entrée de l'interface appartenant à $\mathcal{F}si$ et qui soit lié à f .

$$\forall f \in \mathcal{F}sc \wedge \exists i \in \mathcal{I} \vdash \exists f' \in \mathcal{F}sii \wedge i \in cf \wedge i \in cf' \quad (5.15)$$

Le critère Contrôle Explicite concerne à la fois la prise en compte par le système des actions explicites des utilisateurs et le contrôle qu'ont les utilisateurs sur le traitement de leurs actions. Par Contrôle Utilisateur on entend ici le fait que l'utilisateur doit toujours avoir la main, pouvoir contrôler le déroulement (ex. :interrompre,repandre) des traitements informatiques en cours. Ses actions devraient être anticipées et des options appropriées fournies pour chaque cas.

(a) CORRECTION DES ERREURS

Le critère Correction des Erreurs concerne les moyens mis à la disposition des utilisateurs pour leur permettre de corriger leurs erreurs.

(b) FLEXIBILITÉ

Pour toute fonction f d'entrée de l'interface, il existe plusieurs contextes ks définissant un domaine paramétrique $\mathcal{D}p_f^{ks}$.

$$\forall f \in \mathcal{F}si \wedge \exists ks \in \mathcal{R}s \vdash \exists \mathcal{D}p_f^{ks} \in \mathcal{D}f \wedge \gamma(f, \mathcal{D}f) \wedge \mathbb{C}_{\mathcal{D}p_f^{ks}} \neq 0 \quad (5.16)$$

Le critère Flexibilité concerne les moyens mis à la disposition des utilisateurs pour adapter l'interface afin de rendre compte de leurs

stratégies ou habitudes de travail et des exigences de la tâche. Le critère Flexibilité correspond aussi au nombre de façons différentes mises à la disposition des utilisateurs pour atteindre un objectif donné. Il s'agit en d'autres termes de la capacité de l'interface à s'adapter à des actions variées des utilisateurs.

3. CHARGE DE TRAVAIL

Le critère Charge de Travail concerne l'ensemble des éléments de l'interface qui ont un rôle dans la réduction de la charge perceptive ou mnésique des utilisateurs et dans l'augmentation de l'efficacité de la réalisation d'une tâche.

(a) BRIÈVETÉ

Le critère Brièveté concerne la charge de travail au niveau perceptif et mnésique à la fois pour des éléments individuels d'entrée ou de sortie et les séquences d'entrées (i.e, les suites d'actions nécessaires à l'atteinte d'un but, à l'accomplissement d'une tâche). Il s'agit ici de limiter autant que possible le travail de lecture, d'entrée et les étapes par lesquelles doivent passer les utilisateurs.

i. CONCISION

Pour tout élément i de l'interface participant à une fonction f et une classe formelle g , il existe une fonction $W(i, f)$ dans $\mathcal{D}p_{cg}$ qui détermine la quantité de travail de i . La somme des charges de travail de tous les éléments i participant à f doit être inférieure à une valeur seuil τ .

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \forall cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \vdash \sum W(i, f) \leq \tau \quad (5.17)$$

Le critère Concision concerne la charge de travail au niveau perceptif et mnésique pour ce qui est des éléments individuels d'entrée ou de sortie. Par convention, la Concision ne concerne pas le feedback ni les messages d'erreurs.

ii. ACTIONS MINIMALES

Pour tout élément i de l'interface participant à une fonction f , on définit t comme la série chronologique des fonctions constituant f . Le nombre de termes constituant t est inférieur à une valeur seuil τ .

$$\begin{aligned} \exists f \in \mathfrak{F} \wedge \forall cf \subseteq \mathfrak{I} \wedge \exists i \in \mathfrak{I} \wedge i \in cf \\ \wedge t = (fa, fb, \dots, fz) \wedge t \subseteq f \vdash (z - a) \leq \tau \end{aligned} \quad (5.18)$$

Le critère Actions Minimales concerne la charge de travail quand aux actions nécessaires à l'atteinte d'un but, à l'accomplissement d'une tâche. Il s'agit ici de limiter autant que possible les étapes par lesquelles doivent passer les utilisateurs.

(b) DENSITÉ INFORMATIONNELLE

Pour tout élément i de l'interface, le nombre de i participant à la fonction f utilisée doit être supérieur ou égal à une valeur seuil τ .

$$\forall i \in \mathfrak{I} \wedge \exists f \in \mathfrak{F} \wedge \exists cf \subseteq \mathfrak{I} \vdash \#cf - \#_{\mathfrak{I}}cf \leq \tau \wedge \tau \geq 0 \quad (5.19)$$

Le critère Densité Informationnelle concerne la charge de travail du point de vue perceptif et mnésique, pour des ensembles d'éléments et non pour des items.

4. STABILITÉ SÉMIOTIQUE

Le critère Stabilité sémiotique concerne la constance de l'adéquation entre l'objet ou l'information affichée ou entrée, et son référent. Des codes et dénominations "signifiants" disposent d'une relation sémantique forte avec leur référent. Ce critère concerne également la manière dont l'évolution du système peut modifier la relation sémantique entre la signification voulue par le concepteur et celle assumée par l'utilisateur.

(a) HOMOGÉNÉITÉ/COHÉRENCE

Pour tous éléments i de l'interface participant de la fonction f et pour tout i' participant de la fonction f' , si f et f' appartiennent à une même classe fonctionnelle cf'' , alors i et i' appartiennent à la même classe formelle.

$$\begin{aligned} \exists f \in \mathfrak{F} \wedge \exists g \in \mathfrak{G} \wedge \forall cf \subset \mathfrak{I} \wedge \forall i \in cf \\ \wedge \forall cf' \subset \mathfrak{I} \wedge i' \in cf' \wedge \exists cf'' \subset \mathfrak{I} \wedge (cf \wedge cf') \subset cf'' \\ \vdash \exists cg \subset \mathfrak{I} \wedge (i \wedge i') \in cg \end{aligned} \quad (5.20)$$

Le critère Homogénéité/Cohérence se réfère à la façon avec laquelle les choix de conception de l'interface (codes, dénominations, formats, procédures, etc...) sont conservés pour des contextes identiques, et sont différents pour des contextes différents.

(b) GESTION DES ERREURS

Pour toute fonction f du système, le domaine paramétrique doit être contenu dans le domaine de stabilité.

$$\forall f \in \mathfrak{F}_{\text{SII}} \wedge \forall f' \in \mathfrak{F}_{\text{SC}} \wedge \forall i \in cf \wedge \alpha(i, f) \wedge \alpha(i, f') \vdash \mathcal{D}_{pf} \subseteq \mathcal{D}_{sf'} \quad (5.21)$$

Le critère Gestion des Erreurs concerne tous les moyens permettant d'une part d'éviter ou de réduire les erreurs, et d'autre part de les corriger lorsqu'elles surviennent. Les erreurs sont ici considérées comme des saisies de données incorrectes, des saisies dans des formats inadéquats, des saisies de commande avec une syntaxe incorrecte, etc...

5. COMPATIBILITÉ

Le critère Compatibilité se réfère à l'accord pouvant exister entre les caractéristiques des utilisateurs (mémoire, perceptions, habitudes, compétences, âge, attentes, etc...) et des tâches, d'une part, et l'organisation des sorties, des entrées et du dialogue d'une application donnée, d'autre part. De plus la Compatibilité concerne également le degré de similitude entre divers environnements ou applications ainsi que différents contextes d'utilisation.

(a) LISIBILITÉ

Pour tout élément i de l'interface, le domaine paramétrique de la classe formelle à laquelle il appartient doit être inclus dans le domaine de stabilité de la fonction ψ qui est la perception de l'utilisateur.

$$\begin{aligned} \forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists g \in \mathfrak{G} \wedge i \in cg \\ \vdash \mathcal{D}_{p_{cg}} \subseteq \mathcal{D}_{s_{\psi}} \wedge \psi \in \mathfrak{F}_{\mathcal{H}} \wedge \psi = \text{perception} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Le critère Lisibilité concerne les caractéristiques lexicales de présentation des informations sur l'écran pouvant entraver ou faciliter la lecture de ces informations (luminance des caractères, contraste caractères fond, dimension des lettres, espacement des mots, espacement entre les lignes, espacement entre les paragraphes, longueur des lignes, etc...).

Par analogie, ce critère s'applique aussi aux éléments multimodaux de l'interface comme les alertes sonores ou les messages haptiques.

(b) OPÉRABILITÉ

Le critère Opérabilité est le complément de la Lisibilité. Il concerne les caractéristiques des éléments d'entrée de l'interface et leur adéquation avec les caractéristiques anatomiques et physiologiques de l'utilisateur.

(c) PRISE EN COMPTE DE L'EXPÉRIENCE DE L'UTILISATEUR

On définit kh comme un contexte humain, c'est à dire un utilisateur particulier. Pour toute fonction d'entrée f de l'interface, il existe un domaine paramétrique $\mathcal{D}p_f^{kh}$.

$$\forall f \in \mathfrak{F}si \wedge \exists kh \in \mathfrak{Kh} \vdash \exists \mathcal{D}p_f^{kh} \in \mathcal{D}f \wedge \gamma(f, \mathcal{D}f) \quad (5.23)$$

Le critère Prise en Compte de l'Expérience de l'Utilisateur concerne les moyens mis en œuvre pour respecter le niveau d'expérience de l'utilisateur.

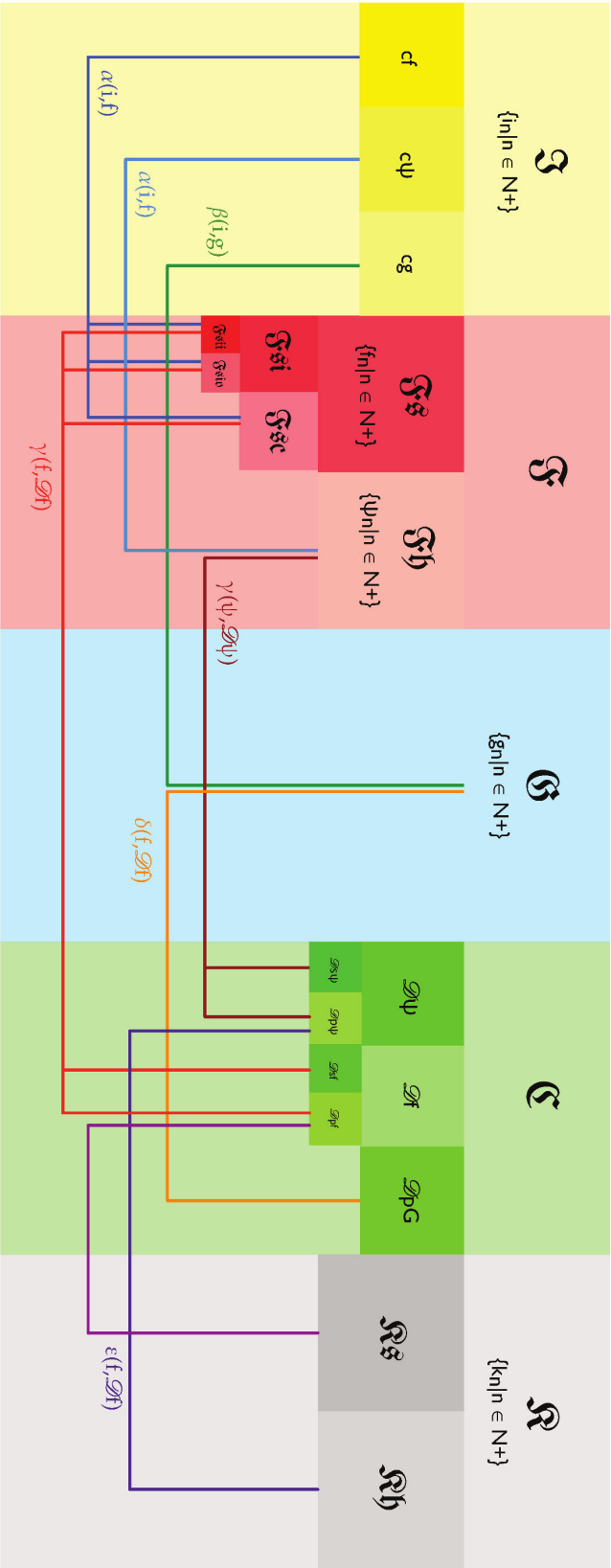


Fig. 5.1 : Structure logique de l'interface humain-machine : Chaque colonne représente un composant de la description formelle d'une IHM. La colonne jaune représente les éléments de structure de l'opérateur et de l'interface, la colonne rouge représente les fonctions de l'opérateur et de l'interface, la colonne bleue représente les formes de base des éléments de l'interface, la colonne verte représente les paramètres des fonctions et la colonne grise les différents contextes qui déterminent ces paramètres. Les fonctions α , β , γ , δ et ϵ représentent les liens entre éléments de ces ensembles tels qu'ils sont définis en ??

CHAPITRE 6

MIDAS

DISPOSER d'outils comme la critériologie de BASTIEN et SCAPIN (1993) est d'un grand intérêt dans la mise en place d'une démarche de conception centrée utilisateurs. Toutefois, ces outils ne permettent pas l'évaluation de l'interface dans des situations d'usage car cela nécessite de simuler le comportement du système au lieu d'évaluer ses propriétés.

Il y a, en fait, une complémentarité de ces outils. Les critériologies sont d'une grande utilité pour juger de l'utilisabilité d'une IHM, qui est liée aux facteurs humains, alors que les simulations permettent de comparer différentes hypothèses de conception, afin de choisir celles qui siéent le mieux aux exigences. Mais elles permettent ce choix sur la base d'autres critères, liés au concept d'opération comme la fatigue, les conditions dégradées.... Ainsi, les critères permettent d'établir l'utilisabilité d'un système, dans l'absolu, mais ne garantissent aucunement son efficacité suffisante en égard aux exigences opérationnelles.

Ce chapitre présente MIDAS, qui est un outil de modélisation de l'usage d'un système par un opérateur humain développé au *NASA Ames Research Center* et dont nous avons pu tester l'utilisation lors de notre visite en juin 2016. Nous y décrirons les propriétés de cet outil avant d'en proposer une extension, basée sur l'utilisation d'ontologies formelles, structurées autour de la logique sous-jacente aux critères de BASTIEN et SCAPIN (1993), et, compatibles avec l'épistémologie intégrative que nous avons mise en évidence dans la première partie.

6.1 PRÉSENTATION

MIDAS, *Man - Machine Integration Design and Analysis System*, entre dans la catégorie des outils de modélisation de la performance humaine¹. On réutilise ici la notion de performance comme traduction littérale de l'anglais *performance*, proxémique de la notion d'activité que TEIGER et FALZON (1995) définit comme "processus d'interaction intelligente d'un opérateur avec les exigences de sa tâche, les contraintes de l'environnement, son état interne, ses objectifs individuels, résulte d'une construction personnelle à celui-ci". Dès lors la performance c'est ce que fait le sujet pour réaliser une tâche simple ou complexe et analyser ou modéliser cette performance revient à décrire de façon quantitative et qualitative les processus permettant la réalisation.

¹ *Human Performance Modeling Tools* en anglais.

GORE (2011) définit MIDAS v5 comme "Un environnement HPM intégré, dynamique, qui facilite le design, la visualisation et l'évaluation informatisée de la conception de systèmes humain(s)-machine(s) complexes, dans des environnements opérationnels simulés."² L'outil MIDAS permet l'évaluation par la simulation de concepts d'IHM et a été développé de façon itérative depuis la première version conçue par BANDA et al. (1991). Au fur et à mesure des développements, MIDAS v5 a acquis aujourd'hui une modélisation beaucoup plus fine des processus liés à l'attention de l'utilisateur ainsi que de la prise de décision.

² Notre traduction. HPM tient ici pour Human Performance Model, c'est à dire des modèles de la performance de l'opérateur.

La notion de concept est ici à considérer comme celle de *concept d'opération* définit par l'JP 5-0, *Joint Planning* - (2017), c'est à dire la description circonstanciée du contexte d'usage d'un système répondants aux questions ; qui fait quoi ? quand ? comment ? où ? pourquoi ?.

Ainsi ce concept d'opération détermine un espace des exigences plus général et dont celui des éléments d'IHM est dépendant et complémentaire. Le rôle de MIDAS dans ce cadre est donc de permettre de comparer, à travers la simulation, différents plans de spécification permettant virtuellement de remplir les exigences du concept d'opération. Cette démarche qui donne un poids important au contexte d'utilisation oblige à penser l'IHM au delà de ses propres qualités et la question générique de ce qu'est ou n'est pas une bonne IHM ne se pose plus en ces termes puisqu'elle se voit remplacée par une démarche de conception littéralement pragmatique. Toutefois, et comme on le voit avec les critères

de SCAPIN et BASTIEN (1997), il est nécessaire de pouvoir à minima concevoir une IHM exempte de dysfonctionnement et le choix entre l'une des options possibles n'est pas celui de la "meilleure" possible mais de celle qui est la plus intéressante en égard aux différents contextes d'opérations envisagés.

FOYLE et HOOEY (2007) recensent, en plus de Air-MIDAS, dérivé aéronautique de MIDAS, 4 outils de modélisation utiles pour la conception aéronautique ; ACT-R³, IMPRINT, D-OMAR et A-SA. On peut, de par leurs caractéristiques intrinsèques distinguer trois catégories pour ces modèles ; les modèles de la performance humaine (MIDAS, IMPRINT), les modèles cognitifs (ACT-R, A-SA) et enfin D-OMAR qui se place comme solution intermédiaire entre ces deux types de modèle. Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser aux modèles hybrides IMPRINT/ACT-R et aux modèles MIDAS/A-SA afin de dégager les spécificités de MIDAS et en poser une analyse détaillée d'un point de vue épistémologique.

³ ANDERSON, MATESSA et LEBIÈRE (1997) développent ACT-R comme un modèle de la cognition fondé sur la distinction entre connaissance procédurale et déclarative. Son but est de décrire comment la cognition utilise ces types de connaissance afin de traiter l'information et agir dans l'environnement.

6.2 LE MODÈLE HYBRIDE IMPRINT / ACT-R

IMproved Performance Research and INtegration Tool est un modèle qui permet de décomposer un système en réseau de tâches. Chaque tâche se décompose en fonctions remplies par certaines entités selon des paramètres connus ou estimés. Ces deux paramètres importants sont la durée et l'exactitude du résultat. Cette architecture permet alors de calculer et de simuler les performances de réalisation des tâches pour un système donné et dans un contexte donné. Dans cette forme initiale, le but premier du programme IMPRINT est de permettre de prévoir et d'optimiser les besoins en main d'œuvre concernant la maintenance d'un système donné dans un contexte opérationnel donné. Ainsi les facteurs modélisés sont la charge de travail, les compétences et les performances des opérateurs ce qui permet *de facto* un vaste champ d'application en termes de gestion des ressources humaines⁴.

⁴ Au sens littéral de la notion de ressource humaine

IMPRINT est un modèle de l'armée américaine qui repose sur Micro Saint Sharp, logiciel développé par Alion Science and Technology et qui repose sur une modélisation événementielle discrète, stochastique et dynamique. BLOECHLE et SCHUNK (2003) présentent Micro Saint Sharp comme un outil permettant la simulation discrète d'événements et qui se présente comme un outil basé sur les réseaux de tâches. Il présente

l'intérêt majeur de ne pas être lié à une représentation spécifique à un domaine d'application en particulier, ce qui le rend généraliste. Il est également possible d'adapter le logiciel à des modules spécifiques à un usage, comme c'est le cas pour MIDAS et IMPRINT.

Ainsi le modèle du système est un graphe fonctionnel contenant d'autres graphes dont les étapes représentent les actions nécessaires à l'accomplissement d'une tâche. Concrètement cela revient à parcourir le graphe à partir d'une action de départ et, pour chaque étape successive, calculer la probabilité de réussite de cette étape ainsi que la durée d'accomplissement en fonction des facteurs évalués. Cela permet, en fin de simulation, d'évaluer la charge de travail opérationnelle des opérateurs ainsi que leur performance. Dès lors, la dimension stochastique des modèles IMPRINT en fait une méthode Monte-Carlo permettant d'estimer en fonction de paramètres connus la zone de stabilité du système étudié.

ACT-R, pour *Adaptive Control of Thought—Rational* est à la fois un outil de modélisation et une théorie originellement établie par ANDERSON (1976). ANDERSON et al. (2004) présente la théorie comme une explicitation du comportement modulaire permettant le fonctionnement de la cognition humaine. Cette approche qui suppose une spécialisation de certaines structures cognitives est directement héritière du cognitivisme classique, notamment de NEWELL (1994) et FODOR (1983). Ces modules sont coordonnés par ce qu'ANDERSON et al. (2004) nomme *système de production central* qui sélectionne et transmet l'information pertinente en fonction de l'intention du sujet.

ACT-R est donc, par nature, un système apte à modéliser les comportements cognitifs intentionnels, c'est à dire les actions qui permettent d'effectuer une tâche. Ainsi, le modèle distingue les connaissances des compétences chez l'opérateur en cela que les connaissances sont ce qui est susceptible d'apprentissage et d'entraînement pour résoudre un problème donné alors que les compétences sont des capacités cognitives utiles pour résoudre une grande variété de problèmes distincts.

Comme le soulignent LEBIERE, ARCHER, WARWICK et SCHUNK (2005), ACT-R est une approche bottom-up de la modélisation comportementale en cela qu'une tâche complexe est construite par combinaisons d'actions élémentaires et de connaissances atomiques. En cela, on peut noter une

complémentarité avec IMPRINT qui modélise les tâches en les décomposant en fonctions plus simples. Cela ouvre la voie vers une hybridation de modèles permettant en droit de considérer un modèle IMPRINT/ACT-R comme plus exhaustif qu'un modèle IMPRINT traditionnel. La raison de cela est que l'une des difficultés d'application d'ACT-R se trouve dans la difficulté de modélisation de l'attribution des informations aux différents modules. En usage conjoint avec IMPRINT, celui-ci fournit ces éléments au modèle ACT-R sous la forme d'une contrainte extérieure et le transformant ainsi en simulation des tâches cognitives et motrices au lieu d'un modèle général de la cognition.

6.3 LE MODÈLE MIDAS/A-SA

Tout comme IMPRINT, MIDAS se base sur le moteur MicroSaint Sharp pour conduire la simulation. Ce qui distingue MIDAS d'IMPRINT est l'approche de modélisation. Principalement conçu pour modéliser et prévoir des besoins en ressources humaines, IMPRINT permet de construire des modèles quantitatifs de la performance des opérateurs lors de la réalisation d'une procédure. Ainsi, certaines dimensions relatives au facteur humain et liées aux problématiques d'IHM ne sont pas prises en compte à titre de paramètre.

Ainsi ce fonctionnement natif d'IMPRINT le rend pertinent dans le contexte d'un système technique donné et dont les besoins opérationnels détaillés sont connus ce qui en fait un outil d'analyse de l'organisation des tâches extrêmement pertinent. Comme le précise GORE (2011), MIDAS permet des questionnements hypothétiques et une analyse qualitative de la tâche. Cette approche nécessite d'établir une co-modélisation du comportement du système et de ses opérateurs de façon intégrée, c'est à dire en considérant ces opérateurs comme des éléments techniques dotés de propriétés particulières.

Ainsi, MIDAS met en œuvre un agent et un système qui ne sont pas des entrées ou sorties d'information l'un pour l'autre mais qui sont deux ensembles complexes de fonctions liées par des fonctions spécifiques qui sont les actions et les perceptions. Ainsi, à partir d'un réseau de tâches, au lieu de calculer les probabilités de succès ou d'échec d'une procédure, MIDAS va piloter un ensemble de modèles qui vont eux-mêmes modifier la manière de parcourir le réseau. La partie la plus importante

de MIDAS est le module de traitement des informations. Ce module a pour tâche de simuler les comportement de l'opérateur humain dans l'environnement que constitue le poste d'équipage. Il se constitue de trois modèles ; perception, mémoire et attention.

Le modèle perceptuel de MIDAS traite l'information en tant que message lié à un objet du champ visuel. Par conséquent la perception de cette information se fait selon deux paramètres ; durée d'observation et perceptibilité de l'objet. Selon ce paradigme, un message porté par un objet peut être perçu selon plusieurs modalités temporelles : inaperçu, perçu et compris pour un élément de l'interface, inaperçu, perçu, reconnu et identifié pour un objet de l'environnement du système. Ce paradigme est fortement inspiré des procédures en place en aéronautique et repose sur le fait qu'une interface, comme une situation, se lit, à travers une grammaire et un vocabulaire symbolique spécifiques appris à travers l'entraînement. Dès lors, la compréhension d'un message est essentiellement liée, si l'on excepte les facteurs environnementaux, à la complexité et à la longueur de ce message ce qui permet d'établir une durée plancher sous laquelle la compréhension devient impossible. Le facteur de perceptibilité influe fortement sur la perception puisqu'il repose sur la présence du message dans le champ visuel de l'opérateur⁵ ainsi que sur les conditions environnementales de la perception⁶.

⁵ Notamment en ce qui concerne l'obstruction par d'autres objets.

⁶ Bruit de fond, brouillard, luminosité, etc ...

⁷ *Situation awareness.*

Ce modèle de la perception est à mettre en lien avec la notion de conscience de la situation⁷ c'est à dire la capacité de l'opérateur à appréhender les relations du système et de son environnement en fonction de la tâche à accomplir. En aéronautique, cela passe par deux types de relation à l'environnement, l'une qui est immédiate et qui consiste à observer les objets extérieurs à travers les glaces du cockpit de façon directe ainsi que de façon indirecte à travers les éléments d'interface.

Conjointement à ce module perceptif, MIDAS comporte un module mémoriel également fonction du temps. Les trois paliers temporels qui le déterminent sont la Mémoire de Travail (WM), la Mémoire de Travail à Long Terme (LT-WM) et la Mémoire à Long Terme (LTM). Ce module prend en charge la rémanence d'une information donnée en fonction de sa provenance et de l'assiduité avec laquelle l'opérateur lui y est confronté.

A l'aide de ces deux modules, s'il est possible de rendre compte avantageusement de la manière dont une information donnée pourra être

intégrée par l'opérateur, il est impossible de rendre compte de la manière dont celui-ci va prioriser certaines informations et diriger son attention. Ceci est une grande divergence entre MIDAS/A-SA et IMPRINT/ACT-R dans la mesure où IMPRINT/ACT-R est déontique⁸ en cela que le réseau de tâches d'IMPRINT effectue cette priorisation et sélection des événements d'ACT-R alors que MIDAS possède un modèle propre basé sur le modèle A-SA afin de guider l'attention de l'opérateur et la conscience de la situation ce qui en fait un modèle réellement descriptif.

⁸ Du grec δέον signifiant devoir. Un modèle déontique est alors un modèle partant d'une description idéale de la chose modélisée afin d'en évaluer les paramètres.

Cette approche se fait à travers le modèle SEEV (saillance, Effort, Expectancy, Value) dont le but est, selon GORE, HOOEY, WICKENS et SCOTT-NASH (2009), de prédire quand et comment l'opérateur humain va détecter un événement dans son environnement. Ce modèle fournit la probabilité qu'un événement donné attire l'attention de l'opérateur. Quatre paramètres influencent donc le comportement attentionnel de l'opérateur :

- La saillance (S), qui est l'une des propriétés de l'événement et qui représente sa visibilité toutes choses étant égales par ailleurs. Un flash lumineux ou une alarme sonore ont une grande saillance, contrairement à un glyphe imprimé sur une touche de clavier par exemple.
- L'effort (EF) requis pour que l'opérateur concentre son attention sur l'événement. Ce paramètre agit comme antagoniste de la saillance en cela qu'un événement saillant dans le champ perceptuel de l'opérateur demandera moins d'effort que le même événement s'il était difficilement accessible.
- L'attente (EX) de la part de l'opérateur vis à vis de l'événement. Ce facteur impacte positivement ou négativement la probabilité d'attirer l'attention selon que cette attente est négative ou positive. Ainsi dans certains contextes l'opérateur attend d'un événement qu'il demeure constant sur une durée de temps donnée où qu'il change de façon prévisible. L'attente constitue alors un paramètre qui détermine le caractère intempestif d'un événement.
- La valeur (V) représente l'importance d'un événement donné en relation à la situation en cours et qui rend certains événements virtuellement prioritaires sur d'autres.

Ainsi la probabilité que l'attention d'un opérateur se fixe sur une zone déterminée de l'environnement $P(AOI)$ se détermine ainsi selon GORE et al. (2009) :

$$P(AOI) = sS - efEF + exEX + vV$$

Ici, les variables en majuscule représentent les paramètres que l'on vient de décrire alors que les variables minuscules représentent les facteurs de pondération introduits par WICKENS et al. (2008) dans leur modèle A-SA sur lequel repose SEEV. Ainsi, le modèle A-SA et le modèle SEEV décrivent deux éléments principaux qui sont l'allocation d'attention et la compréhension de la situation. Ce qui en découle est la capacité pour MIDAS, en fonction de la localisation des objets, de leurs propriétés et d'une description précise des tâches à effectuer, de modéliser les dimensions de réticulation telles qu'elles sont posées par les critères ergonomiques. En effet, le principal facteur négatif lié à l'effort est fortement lié au fait que l'attention de l'opérateur soit concentrée pour une tâche donnée sur une zone précise de l'environnement. Dès lors si le critère de réticulation analogique est respecté, les événements qui sont liés à la tâche en cours doivent être dans, ou à proximité suffisante de, la zone d'intérêt de l'opérateur. Conjointement, la réticulation homologique pose qu'un événement qui a lieu hors de cette zone d'intérêt ne concerne pas les éléments d'interface liés à la tâche en cours et peuvent par conséquent être problématiques.

De même, SEEV permet de modéliser les messages d'erreur de façon intéressante puisque ceux-ci possèdent, par définition, une grande valeur mais une petite attente, ce qui rend l'alarme fortement dépendante de la saillance et de l'effort. Ainsi, on voit bien que ce qui fait différer MIDAS d'IMPRINT est sa prise en charge extrêmement importante des éléments de contexte qui permettent de décrire une situation. Ces éléments peuvent être de nature physique et seront traités par JACK.⁹ et le modèle perceptif mais ils peuvent également être de nature informationnelle et ainsi être à la fois perceptuels et mémoriels. L'allocation de l'attention a un impact important sur la charge de travail puisque, mal gérée, elle augmente mécaniquement le temps nécessaire à la réalisation d'une tâche lorsque des éléments ne sont pas mémorisés par l'opérateur et doivent donc être traités à nouveau.

⁹ Comme le résume BLANCHONETTE (2010), JACK est un mannequin numérique développé par Siemens à des fins de simulation des espaces de travail. Il se base sur des données anthropométriques, anatomiques et biomécaniques et permet ainsi l'animation et la simulation du mouvement par cinématique inverse.

L'autre différence entre MIDAS et IMPRINT tient au fait que MIDAS modélise le facteur humain alors qu'IMPRINT décrit principalement la ressource humaine. JACK est un mannequin numérique développé par Siemens et qui permet à MIDAS de visualiser le comportement de l'opérateur dans le poste de travail mais également de disposer de données anthropométriques importantes pour rendre le modèle pertinent. Alors et comme on l'a vu, cet ancrage anthropométrique permet de calculer finement les comportements perceptifs mais également les manipulations effectuées par l'opérateur ce qui permet l'analyse complète de l'IHM puisque les problèmes liés à la conscience de la situation touchent autant la prise d'information que les actions de l'opérateur.

*

**

L'APPROCHE adoptée par MIDAS se révèle extrêmement pertinente pour analyser les dimension hamartogènes¹⁰ d'un environnement. Ceci est intéressant puisque, comme on l'a vu, considérer l'IHM de façon non intégrée à la totalité du système *in situ* fait manquer une partie importante des problèmes d'utilisabilité. Telle qu'elle est mise en place dans la version 5, cette approche ne demeure toutefois pas exempte de certaines problématiques délicates à traiter.

¹⁰ Du grec *ἁμαρτία* signifiant erreur ou méprise. Est donc hamartogène ce qui est source d'erreur.

De façon similaire à IMPRINT, MIDAS modélise de façon satisfaisante des opérateurs experts. Ce qu'on appelle opérateur expert selon GLASER (1985) est un individu qui, pour une activité donnée, a développé de façon progressive au cours du temps une connaissance spécifique des procédures de telle façon qu'il puisse analyser les situations selon des patrons suffisamment génériques afin de ne pas avoir à analyser l'intégralité de ces situations.

Ainsi ce qui distingue l'expert du novice c'est la capacité à construire et mobiliser ces patrons situationnels. Dans MIDAS, cela se traduit par la capacité de modifier les valeurs de seuil des modèles de perception, de mémoire et les paramètres de SEEV. Cette modification des seuils permet de reproduire les dimensions temporelles de la performance experte puisque l'usage de ces patrons situationnels se manifeste essentiellement à travers ceux ci, la probabilité de réussite de la tâche étant dépendante d'autres facteurs. Ce que l'on appelle ici *patron situationnel* est la série des propriétés prises par différent éléments de l'environnement dans

une situation donnée, c'est à dire ce qui résulte de la capacité pour un ensemble d'éléments de l'environnement, pris collectivement, à se comporter comme un signe pour certains observateurs dans certaines circonstances.

Toutefois, MIDAS est conçu pour répondre à des besoins similaires à ceux aéronautiques, domaine qui possède comme spécificité d'être extrêmement codifié à travers des procédures standardisées. De façon similaire à ce qui est nécessaire pour IMPRINT, MIDAS nécessite donc de supposer un niveau d'expertise minimal important de la part des opérateurs modélisés. Ce point est important car, comme on l'a vu, si MIDAS rejoint les critères ergonomiques sur l'importance de certaines dimensions de l'IHM, il ne partage pas les mêmes utilisateurs. En effet, si ce qui distingue l'expert de l'utilisateur est la mobilisation des patrons situationnels et la connaissance déclarative qui l'accompagne généralement, cela induit une différence de comportement sémiotique entre l'expert et le novice qui n'est pas seulement une différence quantitative. En effet, là où l'expert peut interagir de façon parallèle avec certains éléments d'interface, le novice va les analyser séquentiellement afin d'en déduire une signification. Dès lors, il devient assez problématique de prendre en compte le différentiel d'expertise qui se présente dans des domaines moins procéduraux que l'aéronautique comme l'automobile. On peut actuellement tenter d'approcher les caractéristiques de ces systèmes en dégradant les performances optimales à l'aide des PFS¹¹ tels que la charge de travail ou la fatigue.

¹¹ Pour *Performance Shaping Factors*, qui sont des caractéristiques du système dont on connaît l'effet sur la dégradation de la performance de l'opérateur.

L'un des intérêts de MIDAS est qu'il permet de modéliser le comportement de l'opérateur et du système en fonction d'hypothèses sur le contexte. Comme on l'a vu, il est extrêmement délicat de modéliser certains types de public en raison des différences qualitatives entre leur expérience et celle d'un opérateur expert. Cela a trait à une dimension plus générale de MIDAS qui est le statut de ses objets. En raison de son implémentation liée à MicroSaint Sharp, MIDAS modélise un système technique en situation d'usage comme un ensemble d'événements successifs dotés de propriétés propres. Ainsi, certaines propriétés de l'IHM modélisée comme sa géométrie influent fortement sur ces événements car elles en constituent le contexte.

Ainsi, de la même manière que l'opérateur n'est pas modélisé intrinsèquement comme objet mais décomposé comme événements, les systèmes modélisés le sont également. D'un point de vue ontologique cela correspond bien à une description pluraliste d'un phénomène selon la définition de JAMES :

« Considéré pragmatiquement, le pluralisme qui est la doctrine voulant qu'il y ait du multiple signifie seulement que les diverses parties constituant la réalité peuvent être liées de façon externe. Tout ce à quoi vous pouvez penser, vaste ou réduit, possède véritablement dans la conception pluraliste un environnement 'extérieur' de quelque nature. Les choses vont les unes 'avec' les autres de multiples façons mais aucune n'inclut ou domine toutes les autres. Le mot 'et' suit chaque phrase. Quelque chose s'échappe toujours. Les meilleures tentatives pour atteindre une inclusion absolue ne sont 'jamais suffisantes'. Le monde pluraliste est bien plus une république fédérale qu'un empire ou un royaume. Peu importe ce qui peut être collecté, peu importe ce qui peut signaler sa présence au centre de l'attention ou de l'action, quelque chose d'autre est autonome, absent et non réduit à l'unité. »

JAMES, *A Pluralistic Universe*, 1909

Ce pluralisme est parfaitement cohérent avec l'idée que nous développons concernant la dimension nécessairement événementielle de la causalité mais pose ce que l'on peut nommer le *problème du point de vue*. Sans aller jusqu'à reprendre l'histoire de la métaphysique ce problème est une constante en cela qu'il nécessite de poser explicitement ce que que sont le cosmos et l'univers ainsi que ce qui les distingue. Chez les grecs, le cosmos et l'univers sont une seule et même chose puisque l'ordre naturel des choses est le seul possible. Dans une métaphysique chrétienne influencée par la notion de δημιουργός¹² issue de PLATON (p. d.-c) l'ordre du monde est à distinguer des choses du monde. Alors l'ontologique rejoignait naturellement le cosmologique puisque tous deux sont issus d'un seul et même décret. Comme on l'a vu avec l'émergence d'une pensée de la technique qui marque la modernité occidentale, il ya un dédoublement de l'ontologique et du cosmologique puisque ce dernier tend à devenir le domaine du scientifique à travers le concept de nature qui permet d'établir deux points de vue distincts mais liés sur l'univers ; l'ontologique qui est un point de vue divin et le cosmologique qui est un point de vue humain.

¹² Traduit classiquement par *démiurge*, l'artisan.

Bien évidemment, ces considérations se relâchent lorsqu'il s'agit de fabriquer des modèles du comportement humain mais cette dualité

de point de vue persiste dans la mesure où, dans le cas de MIDAS, si un phénomène décrit par l'intermédiaire de causes événementielles uniques est ontologiquement extrêmement pertinent il est beaucoup plus problématique d'un point de vue cosmologique c'est à dire un point de vue qui concerne l'architecture des événements. C'est en effet du point de vue cosmologique que s'exprime la généricité des choses et non au niveau ontologique, ce qui explique qu'il n'existe pas de *choses en soi* mais que des particuliers similaires.

L'expression de cette généricité permet l'expression de la complexité de certains systèmes qui possèdent par là même certaines propriétés compositionnelles irréductibles à leurs composants. Cette nécessité rejoint ce que BJØRNER et EIR nomme le "dogme de l'ingénierie de domaine" :

« Avant de concevoir le logiciel, nous devons comprendre ses exigences.
Avant que les exigences puissent être exprimées, nous devons comprendre
le domaine d'application. »

BJØRNER et EIR, *Compositionality : Ontology and mereology of domains*,
2010

Décrire le domaine d'un système technique, c'est donc être capable de décrire le comportement de ce système au travers des entités qui le composent et en fonction de celles avec lesquelles il va interagir. Cela implique de posséder un moyen de formaliser la généricité de façon satisfaisante. Si dans une métaphysique pluraliste les *choses en soi* sont absurdes il en va tout autrement des classes d'objets. De façon similaire aux clades en biologie, les classes d'objets n'ont de réalité autre que celle que leur confère la méthode qui a servi à les produire. Par conséquent, et la chose a déjà été relevée par SIMONDON (1958), la classification des objets techniques est délicate dans la mesure où elle peut se faire selon un grand nombre de critères.

*
**

Si l'on considère qu'une ontologie peut servir de support à cette généricité, il faut toutefois prendre garde à une problématique importante qui est celle de la circonscription du champ qu'elle décrit. Ainsi, ce que l'on a abordé dans la première partie de cette thèse relève de ce qu'on l'on peut appeler *ontologie fondationnelle* en cela qu'elle cherche à décrire le monde en termes trop généraux pour que cette description soit utilisable sans avoir recours à des précisions.

Ces éléments suffisent certes à pouvoir expliciter les différences entre l'humain et la machine ainsi que la nature des relations entre les deux mais ne sont d'aucun secours au concepteur qui aura besoin de construire une *ontologie du domaine* permettant un détail de description plus avancé. Ce que permet une ontologie du domaine, c'est essentiellement l'attribution, par familiarité, de propriétés à un événement¹³ et la capacité de mettre en évidence des propriété compositionnelles de ces événements.

¹³ On parle ici d'événement puisque, comme on l'a vu dans la première partie, une chose est ce que l'on peut décrire et ce que l'on peut décrire est toujours *in fine* un événement.

Ainsi, dans cette optique, décrire une portion de la réalité, revient à décrire les évolutions conjointes d'un ensemble d'événements dans une fenêtre spatio-temporelle déterminée. Ce que fait MIDAS, c'est décrire un ensemble d'événements discrets sous la forme d'une succession de tâches coordonnées temporellement et, le cas échéant, liées logiquement. Dès lors, l'analyse de la tâche et la modélisation de la procédure qui en découle n'est pas équivalent à une analyse de l'interaction puisque la tâche, qui correspond à ce que nous appelons avec FASS (2012) une fonction du système n'est que la résultante d'un ensemble d'interactions entre divers systèmes au sein d'une organisation déterminée.

Dans cette optique, disposer *a minima* d'une catégorisation telle que celle présentée dans la figure 4.1 (page 160) est importante car, comme on l'a vu, la nature des éléments en relation influence la nature de l'interaction comme le montre la figure 4.1 (page 162). Ces catégories permettent en effet d'envisager l'interaction comme la mise en relation de plusieurs objets participant de plusieurs classes de significativité. Ainsi un écran tactile est à la fois un actuateur visuel et un capteur électrique ce qui en fait un objet doté de propriétés différentes d'un écran non-tactile ou d'un clavier mécanique.

De plus, cet usage de classes de significativité permet d'envisager la création d'individus au sein de MIDAS. Actuellement, MIDAS permet à l'utilisateur de créer des graphes imbriqués permettant de référencer en ensemble d'événements susceptible de se produire à plusieurs reprises. Toutefois, chaque itération de ce graphe imbriqué est en fait un événement totalement nouveau et qui va se dérouler en fonction des variables d'entrée. La notion d'individu dans ce contexte concerne en fait la transitivité temporelle des paramètres du graphe imbriqué. Il serait ainsi possible d'instancier le même objet à plusieurs reprises et de modéliser certains phénomènes issus de la complexité de l'interface.

En outre, cette manière ontologique d'envisager la modélisation de l'individu permettrait de réduire l'asymétrie qui existe actuellement dans un modèle de l'interaction {humain - machine} tel que MIDAS et qui modélise l'opérateur de façon différent des autres éléments du système. Comme le décrit GORE et al. (2009), la probabilité de fixation visuelle d'un élément de l'interface en fonction d'un contexte est actuellement calculée sur la base de recherches expérimentales et est alors utilisée en conjonction avec le modèles SEEV pour parcourir le graphe des tâches.

Cette approche est extrêmement performante pour modéliser le risque d'erreurs issues d'une mauvaise gestion de la charge de travail ou de l'attention de l'opérateur mais n'est pas la description d'une interaction au sens où nous l'avons définie plus haut. Parvenir à construire des systèmes individuels dans le modèle permettrait donc, de modéliser les interactions au delà de leurs conséquences sur la procédure ce qui permettrait d'augmenter la compréhensivité du modèle.

*

**

L'AUTRE intérêt majeur dans l'adoption d'une ontologie adossée à MIDAS réside dans la possibilité qu'elle apporte de faire usage de méthodes formelles. Dans ce domaine, GRUBER (1993) définit l'ontologie comme la spécification explicite d'une conceptualisation, on considère alors comme existant ce qui est représentable.

WING (1990) définit les méthodes formelles comme des cadres de travail basés sur les mathématiques permettant de "spécifier, développer et vérifier des systèmes de façon systématique et non pas *ad hoc*". Ces méthodes sont appliquées à travers l'usage d'un langage formel permettant la description du système étudié à l'aide de méthodes de validation logiques.

Plus récemment, MÉRY et SINGH (2012) ont proposé une méthodologie de conception logicielle basée sur les méthodes formelles à des fins d'usage dans les systèmes critiques.

L'étape dite de *spécification formelle* est celle qui nous intéresse ici dans la mesure où cette spécification se fait à partir de l'utilisation d'une méthode de spécification ou d'un langage dédié, comme B¹⁴ ou VDM¹⁵.

¹⁴ Originellement développée par ABRIAL, LEE, NEILSON, SCHARBACH et SØRENSEN (1991)

¹⁵ Voir FITZGERALD, LARSEN et VERHOEF (2007) à ce sujet.

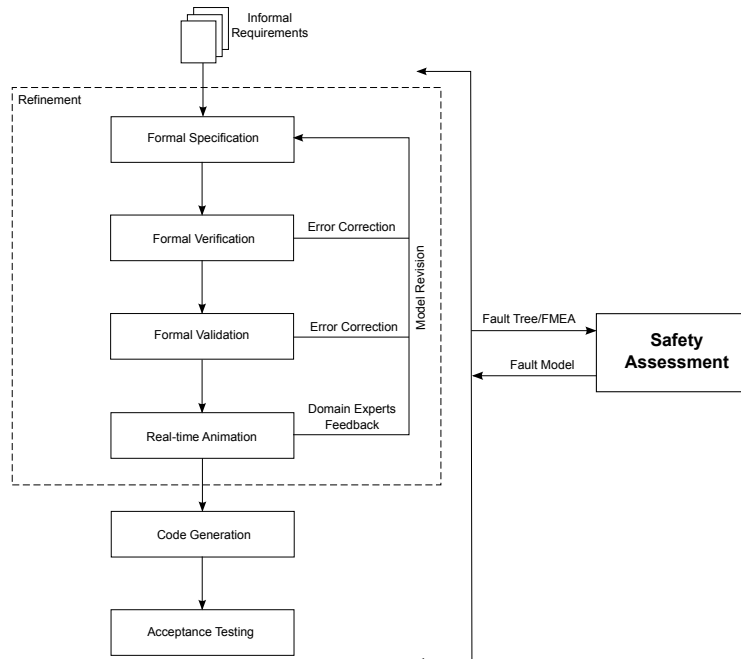


FIG. 6.1 : Le développement basé sur les méthodes formelles, d'après MÉRY et SINGH (2012) : À partir des "besoins informels" qui constituent le cahier des charges de départ, est conduite une procédure de formalisation logique qui, par raffinement, va permettre d'obtenir un modèle satisfaisant les besoins ce qui permet la production du logiciel.

De façon générique, ces méthodes se fondent sur la formalisation de l'ontologie du domaine sous la forme d'un ensemble de prédicats logiques que l'on va ensuite instancier afin de décrire l'état du système lors de chacun de ces changements d'état. Ainsi, il existe un parallèle entre la structure logique émergente de critères de BASTIEN et SCAPIN (1993) décrite dans la figure 5.1 (page 208) et ce type d'ontologies.

En effet, ce que décrit la figure 5.1 (page 208) est l'ensemble des objets qui composent une IHM ainsi que les fonctions qui permettent de structurer cet ensemble en sous-ensembles d'objets ayant des propriétés particulières ce qui correspond à la structure d'un modèle formel. Dans ce modèle de l'IHM, on définit un objet i par l'ensemble des fonctions logiques $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ et ϵ qui associent i à des objets définis génériquement tels que des paramètres formels ou des fonctions du système. Chaque élément de l'interface est donc descriptible à l'aide d'une série de prédicats dont la signification peut être évaluée grâce aux critères ergonomiques formalisés par des règles logiques.

Alors, chacun des critères d'évaluation qui nous avons cherché à retranscrire permet d'établir une base de règles dont l'application permet d'évaluer les dimensions ergonomiques de l'IHM. Ainsi cette logique sous-jacente est susceptible d'être formalisée ce qui permettrait son utilisation conjointe à celle d'un modèle de la tâche qui permettrait de mettre en lumière les problématique d'IHM liée à l'exécution d'une séquence de tâches de façon dynamique.

Un modèle formel de l'IHM peut donc être tiré d'une critériologie qui va agir comme cadre générique pour l'établissement des spécifications. Dans la mesure où MIDAS est structuré par un modèle de tâches discret coordonné par MicroSaint Sharp, ce dernier peut être utilisé pour également coordonner le modèle formel. Cela tient à la structure même du réseau de tâches de Sharp qui se compose de tâches, de liens et de nœuds conditionnels permettant de choisir, le cas échéant, entre plusieurs chemins en fonction d'un critère déterminé¹⁶. Sharp permet de déterminer l'appartenance d'un objet à un groupe mais cela ne constitue pour autant pas un accès à la généricité dans la mesure où cela n'a aucune incidence sur le déroulement du modèle puisque le groupe en lui même ne dispose pas de propriétés particulières.

¹⁶ Purement probabiliste ou bien lié à une règle.

Si l'on considère l'IHM et l'opérateur comme des systèmes de systèmes, plutôt que comme une collection d'objets en interaction, l'on se trouve obligé de prendre en compte la relativité d'échelle propre à ces systèmes et notamment celle liée aux interactions comme le montre la figure 4.1 (page 162). Ainsi, la structure "horizontale" de MicroSaint Sharp ne permet pas de traiter ce problème de façon satisfaisante alors qu'une ontologie du domaine permet cela en attribuant à chaque niveau d'échelle un jeu de règles spécifique en fonction des interactions qui le caractérisent.

Il deviendrait ainsi possible de modéliser de façon exhaustive les interactions en jeu dans ce que FASS et GECHTER (2015) appellent les *bio-CPS* et qui trouvent leur modèle générique dans la figure 3.3 (page 145). Ces *bio-CPS* ou systèmes *biocyberphysiques* recouvrent une part de ce que nous nommons *complexes anthropotechniques*. Plus précisément, cette catégorie de systèmes correspond à des réseaux de capteurs et d'effecteurs coordonnés par un élément logiciel leur assurant une certaine autonomie d'action. Dans ce contexte, un système biocyberphysique sera compris

comme un système cyberphysique dont la spécificité sera de devoir être intégrable dans la biologie humaine, par l'adoption de matériaux spécifiques ou la prise en charge de fonctions biologiques.

Cette modélisation des interactions se ferait toutefois *par les effets* en ce sens que le module ontologique ne changerait pas le fonctionnement de MIDAS mais le ferait passer d'un outil de modélisation de la performance humaine à un outil de modélisation du fonctionnement des systèmes anthropotechniques. Les modèles fonctionnels ainsi construits se fondent donc sur l'intégration {humain - machine} et la forte dimension sémiotique qu'elle présente.

Cette problématique de l'interaction sémiotique est par ailleurs plus large que la simple modélisation des affordances de l'opérateur. En effet, la machine n'afforde rien mais traite des entrées en fonction d'un certain nombre de facteurs. Dès lors, au stade de la conception, il est nécessaire de faire en sorte que ces entrées puissent être contrôlées de façon à éviter les erreurs d'entrée issues du design. Ce problème est important et, comme le montrent MÉRY, SCHÄTZ et WASSYNG (2014), peut être traité à travers l'application de méthodes formelles au développement des logiciels chargés de traiter ces entrées.

*
**

Il y a de multiples bénéfices dans l'adoption d'une ontologie formelle adossée à MIDAS. Le premier d'entre eux est la préservation des spécificités actuelles de l'outil. Sa conception modulaire est en effet voulue d'emblée par GORE (2011) à des fins d'évolutivité et de "neutralité théorique".

D'un point de vue d'utilisation, l'utilisation d'une ontologie formelle permettrait de posséder une bibliothèque des objets du modèle. Cela permettrait de s'assurer que les objets que l'on utilise lors de la création du modèle sont différentes instanciations dans le temps d'un individu unique, évitant ainsi de spécifier *de novo* de nouveaux objets à chaque utilisation. Cela ne remet pas en cause l'intérêt "métaphysique" de MIDAS de ne considérer que des événements individuels pour modéliser l'usage d'un système, car ces individus de l'ontologie n'existent en fait que dans le méta-modèle.

D'un point de vue théorique, l'utilisation d'une ontologie formelle permet d'ajouter à MIDAS la capacité de modéliser formellement de nouvelles propriétés du système ayant trait à une critériologie ergonomique aujourd'hui absente ce qui permettrait de déceler des problèmes d'utilisabilité non directement liés à l'anthropométrie. De plus, cela permettrait d'élargir le champ d'application de MIDAS à des systèmes pour lesquels les procédures d'utilisation sont moins codifiées que l'aéronautique ou l'industrie comme l'automobile, domaine dans lequel le champ décisionnel de l'utilisateur est significativement plus large.

Enfin, il serait possible de connecter MIDAS à des méthodologies formelles de développement logiciel permettant ainsi de considérer l'IHM dans une perspective intégrée allant de l'utilisateur aux aspects calculatoires du système.

6.4 EXEMPLE DE MISE EN PLACE

¹⁷ Cf. page 191

Reprenons l'exemple de la charge de travail¹⁷ :

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \forall cf \subseteq \mathcal{I} \wedge i \in cf \vdash \sum W(i, f) \leq \tau \quad (6.1a)$$

$$\forall cf \subseteq \mathcal{I} \wedge \exists i \in \mathcal{I} \wedge i \in cf \wedge t = (fa, fb, \dots, fz) \wedge t \subseteq f \vdash (z - a) \leq \tau \quad (6.1b)$$

$$\forall i \in \mathcal{I} \wedge \exists f \in \mathcal{F} \wedge \exists cf \subseteq \mathcal{I} \vdash \#cf - \# \mathcal{I}cf \leq \tau \wedge \tau \geq 0 \quad (6.1c)$$

Notre problématique principale est de fixer les différents seuils τ permettant d'évaluer les trois dimensions du critère. Cela peut être fait grâce au *TaskLoad Index* issu des travaux de HART et STAVELAND (1988). Cet outil de mesure auto-rapportée de l'effort nécessaire à la réalisation d'une tâche permet de recueillir une grande quantité de données relative à son coût, selon différents paramètres ensuite synthétisés dans un score général. Avec un nombre assez grand de sujets, il devient possible d'obtenir une mesure estimée de la charge de travail nécessaire à la réalisation d'une tâche, dans des circonstances déterminées et en utilisant uniquement des données expérimentales.

Au sein de MIDAS, la charge de travail est nécessaire à la réalisation d'une tâche est calculée sur la base de primitives comportementales auxquelles sont attribuées un poids relatif à chaque modalité sensorielle qu'elles mettent en jeu. On utilise la théorie des ressources multiples de

WICKENS (2002), qui modélise les capacités attentionnelles de l'opérateur comme une ressource finie, en cela qu'elles sont allouables à différentes tâches mais en quantité limitée. Ainsi, les problèmes liés à la charge de travail peuvent être issus d'une mauvaise organisation de l'allocation ou bien d'une demande trop importante.

Ainsi, MIDAS modélise la charge de travail à partir de données expérimentales sans qu'il y ait quelque besoin de modéliser les caractéristiques des éléments d'interface. Toutefois, et comme le précisent GORE et al. (2011), la priorisation des tâches en cas de conflit se fait en fonction de l'importance, de l'urgence, de la durée et du coût de l'interruption. Alors, comment modéliser un système pour lequel ces paramètres sont moins déterminés par un protocole d'usage bien connu de l'opérateur ?

On touche ici à un point sensible de la modélisation de la charge de travail puisque en cas de conflit générant une surcharge de l'attention de l'opérateur comme par exemple la sonnerie d'un téléphone lors de la conduite automobile, comme dans l'exemple donné par WICKENS (2002), le contexte et les caractéristiques des interactions entre le conducteur et les éléments de son environnement jouent un rôle important.

La modélisation ontologique présente donc un intérêt complémentaire au modèle de charge de travail actuel de MIDAS en cela qu'elle offre la possibilité de modéliser les caractéristiques esthétiques de la perception. Cette modélisation ferait le lien entre SEEV et le modèle *workload* intégré en permettant d'attribuer les paramètres de saillance aux objets à partir de leurs caractéristiques propres et de la manière dont ils sont mis en place.

Il est en effet possible de définir la saillance comme une propriété des éléments de structure de l'IHM issue de leur place dans l'organisation spatio-temporelle (architecture), de leurs propriétés physiques comme la taille ou la couleur (comportement) et de leur évolution en tant que source d'une interaction sémiotique.

Le critère *Densité informationnelle* deviendrait ainsi un critère relatif à la saillance ; $\#cf - \#C_{\tau}cf \leq \tau \wedge \tau \geq 0$ désigne la règle selon laquelle pour une fonction f du système, le nombre d'éléments i de l'IHM liés à cette tâche doit être supérieur aux autres modulo un paramètre τ . Cela peut être modélisé en utilisant la saillance qui serait un paramètre de la forme liée à i et en calculant τ en utilisant la théorie de WICKENS (2002).

Le critère *Actions minimales* est quant à lui pleinement géré par MIDAS en cela qu'il est relatif à l'organisation des actions permettant de réaliser une tâche. Il serait ainsi évalué en utilisant le graphe des tâches que fournit MicroSaint Sharp ainsi que les paramètres temporels du module *workload* de MIDAS afin de définir son τ .

Enfin, le critère *Concision* peut être considéré comme issu des paramètres de la *Densité informationnelle* et des *Actions minimales* pour les tâches complexes. Il devient alors un équivalent à la charge de travail. Pour les tâches simples, une approche expérimentale et anthropométrique permettrait de relier les propriétés des éléments de structure de l'IHM à leurs caractéristiques individuelles de forme et de paramètres.

*
**

Afin de mettre en place cette extension de MIDAS, il serait nécessaire de se baser sur la structure décrite dans la figure 5.1 (page 208). Ainsi, chacun des éléments pertinents de l'interface serait un objet $i \in \mathcal{I}$ en relation avec des fonctions $f \in \mathcal{F}$.

Chaque i possède une forme qui est la réunion de différentes formes $g \in \mathcal{G}$ possédant chacune des paramètres spécifiques comme la taille, la couleur ou la fréquence sonore. Les paramètres $\mathcal{D}pG \in \mathcal{D}$ sont susceptibles d'être modifiées en fonction du contexte $\mathcal{R}$, dont le changement est déterminé par MIDAS.

Sur la base de données expérimentales, il est possible de connaître, pour des conditions données, les paramètres $\mathcal{D}s\psi$ qui sont ceux pour lesquels un i biologique est stable. Par exemple $\mathcal{D}s\psi$ peut décrire le système visuel humain dont on sait que la perception des couleurs est liée à la luminosité ambiante.

Il est ainsi possible de modéliser la perceptibilité d'un objet i ainsi que sa saillance si on la considère comme une perceptibilité supérieure à la moyenne des objets qui l'environnent.

La fonction $\alpha(i, f)$ permet de décrire le lien entre un objet i et une fonction f ce qui, lors de l'exécution d'une tâche dans MIDAS, permet de discriminer les i saillants participant à la tâche f de ceux qui ne sont pas censés intervenir. Cela, couplé à la localisation dans le champ

perceptuel fourni par JACK, comme par exemple le champ visuel, permet de modéliser le critère *Densité informationnelle*.

En ce qui concerne le critère *Actions minimales*, comme il est basé sur un réseau de tâches, MIDAS permet déjà de vérifier le critère. Cette vérification du minimum d'étapes à la réalisation d'une tâche est cependant important pour modéliser la *Concision* car, en utilisant les paramètres DpG et en connaissant quels éléments de structure participent à une tâche, il est possible de calculer le coût de chaque étape en fonction des paramètres des éléments qui y participent. Ainsi, en fixant un seuil pour lequel la concision devient problématique, cela permettrait d'affiner la probabilité de réussite de la tâche dans le modèle.

6.5 BILAN

LORSQUE l'on compare MIDAS/A-SA et IMPRINT/ACT-R, la première chose à relever est la forte connotation idéologique de ce dernier. On l'a vu, ACT-R prend clairement position en faveur d'une modélisation de la cognition organisée autour d'une vision modulaire de celle-ci. Si cette théorie est cohérente du point de vue de sa logique interne, elle se révèle indémontrée jusqu'ici dans la mesure où le corrélat neurologique du module central de traitement de l'information est jusqu'ici introuvé.

En plus de cela, nous avons vu, dans la première partie, que la position intégrative est difficilement conciliable avec le cognitivisme issu des travaux de NEWELL (1994) et qui est à la base de ACT-R. Ainsi, le modèle MIDAS/A-SA se trouve être, d'emblée, plus compatible avec la vision intégrative de la performance humaine qui la pose comme un fonctionnement d'ensemble de l'organisme. MIDAS a en commun avec la critériologie de BASTIEN et SCAPIN (1993) de reposer sur des données expérimentales et de ne pas s'inscrire dans un courant scientifique particulier. Plus encore, une partie des critères comme la *Concision* ou le *Grouperment/distinction par la localisation* peuvent être retrouvés, à titre implicite, dans MIDAS. Pour être précis, il peuvent être mis en évidence dans les principes qui guident le modèle.

La critériologie peut être transformée en une structure logique jugeant les propriétés d'un ensemble de propositions à partir d'un ensemble de règles, ce qui peut être vue comme le point de départ d'un modèle

d'évaluation formel. Ainsi, en construisant une ontologie formelle il est possible d'expliciter cette évaluation formelle en utilisant MIDAS comme outil de pilotage du modèle. Cela permettrait aussi de mettre en évidence des aspects interactifs jusqu'ici non étudiés par le modèle, essentiellement ceux liés aux dimension esthétiques de l'IHM.

La modélisation ontologique serait alors ici utilisée en complément des usages actuels de MIDAS, en vue de lier les modèles actuellement validés à une construction *bottom-up*, par exemple, de la charge de travail.

Cela ouvrirait la voie à l'élargissement du champ d'application de MIDAS à la modélisation de l'interaction sémiotique. Les problématiques liées à la mauvaise gestion de la charge de travail par l'IHM ont en effet un rôle prépondérant sur la stabilité des interactions sémiotiques entre l'opérateur et le système.

De plus, cela permettrait d'utiliser MIDAS comme outil permettant de générer, sur la base de paramètres connus, des hypothèses de conception supplémentaires, liées aux caractéristiques d'organisation et de dynamique de l'IHM et qui ne sont pas utilisés actuellement, au delà de leurs aspects multimodaux.

Conclusions

Conclusions

CONCEVOIR un système anthropotechnique sûr repose sur deux fondamentaux ; la fiabilité de la méthode et la qualité des connaissances utilisées. Le problème qui nous a intéressé dans cette thèse a essentiellement été celui de la méthode de conception. L'évolution des besoins dans ce domaine mène à une exigence de preuve extrêmement importante qui se confronte à un problème d'ordre éthique et logistique et qui est celui de l'évaluation des hypothèses de conception.

Cette exigence de preuve peut, dans certains cas, être remplie par les simulations HITL qui introduisent le facteur humain dans la simulation et permettent d'approximer les conditions réelles d'opération *modulo* tout risque pour l'opérateur. Cette approche est problématique à deux titres ; Les simulations HITL relèvent en fait de la validation expérimentale d'hypothèse et, par conséquent, ne peuvent pas tenir compte de *scenarii* non anticipés par les concepteurs. La preuve qu'ils fournissent est donc provisionnelle aux situations testées. Secondement, tout système n'est pas testable par une simulation HITL, on pensera notamment aux situations en conditions extrêmement dégradées telles que celles présentées par la mission Apollo 13.

Par conséquent, les simulations HOTL¹, qui excluent le recours à l'opérateur humain, présentent un intérêt certain pour palier à ces problèmes. Elles permettent également la mise en place de méthodes du type Monte-Carlo qui, en multipliant les itérations du modèle en en faisant varier les paramètres, transforment le modèle en outil de prédiction statistique.

Mais cette transition d'HITL vers HOTL, si elle fait sortir l'humain physique de la simulation, n'éloigne aucunement le problème des facteurs

¹ Par opposition aux simulations dites *Human In The Loop*, les simulations *Human Out of The Loop* ne nécessitent pas d'être testées sur un opérateur humain.

humains qu'elle fait entrer dans les objets de la simulation. Se repose alors la question fondamentale de toute modélisation qui est celle, duale, de la définition de ses objets ainsi que de leurs liens conjugués.

Ainsi, une part conséquente des problématiques liées à la conception sûre des systèmes anthropotechniques est liée aux dimensions fondamentales de la modélisation et qui reposent donc sur les connaissances mises en œuvre dans sa mise en place. En cela, une interrogation d'ordre épistémologique s'avère nécessaire à la préfiguration de toute démarche de conception. De ce problème précis s'est construite notre principale problématique prescrivant l'ancrage de la modélisation des systèmes anthropotechniques dans un paradigme postcognitivistique visant la cointégration de l'opérateur et de la machine en un système unique doté d'une certaine individualité.

Cette problématique nous a conduit à analyser consécutivement :

1. Ce qui caractérise les principales méthodologies de conception actuelles.
2. Quels problèmes résout une anthropologie intégrative que ne résolvent pas d'autres paradigmes, en particulier celui d'inspiration cognitiviste en vigueur aujourd'hui.
3. Comment comprendre l'ensemble spécifique d'interactions qui s'établissent entre un être humain et une machine et qui produisent le couplage caractéristique à l'anthropotechnique qui est d'ordre sémiotique.
4. Comment caractériser une épistémologie propice à comprendre l'interaction sémiotique.
5. Comment mettre en œuvre cette épistémologie afin de proposer la réforme d'un outil existant et en tirer une connaissance.
6. Comment dériver de cette connaissance une représentation abstraite des systèmes anthropotechniques permettant de modéliser les conditions de leurs interactions.

On distinguera alors les items 1 à 4, qui constituent les fondements d'une *ergonomie théorique*, des items 5 et 6, qui montrent comment ce paradigme permet de faire évoluer notre analyse du phénomène technique et, par voie de conséquence, les outils de conception.

L'ERGONOMIE THÉORIQUE

Ce qui détermine la possibilité d'une ergonomie théorique, c'est l'épistémologie pragmatique que nous lui associons. Elle pose que les idées et les concepts sont des instruments de la pensée et qu'en tant que tels ils sont susceptibles d'usages comme de mésusages. Ensuite, elle exige que les idées soient communicables, c'est à dire utilisables par la communauté. Enfin, puisqu'elle juge la valeur d'une idée, valeur qui dépasse la seule vérité, à l'aune de son *utilité pratique*, elle se doit de tenir compte de son contexte d'usage.

Il est d'usage, dans la pensée francophone, de réserver le terme d'épistémologie à l'étude de la science en tant que théorie et pratique. Mais le problème qui nous intéresse ici n'est pas à proprement parler scientifique. Ce problème d'usage de la connaissance scientifique que nous avons tenté de soulever et de clarifier dans cette thèse relève plutôt d'une ingénierie entendue comme la pratique de ceux qui recherchent une solution rationnelle à un problème d'ordre pratique. À cet égard, une épistémologie pragmatique répond à cette double exigence de faisabilité et de rationalité puisque, au lieu de rechercher ce qui fait la vérité d'une idée, elle s'attache à son opportunité c'est à dire ce qui fait qu'elle nous permette d'agir dans le monde de façon sûre.

Agir de façon sûre, c'est exactement ce que recherche le concepteur d'IHM. Il a alors besoin d'épistémologie mais celle-ci ne lui est que de peu secours lorsqu'elle est présentée sous sa forme la plus brute. Toutefois, et on l'a vu dans la première partie, aborder un problème comme l'interaction humain(s)-machine(s) sous l'angle épistémologique est, au niveau conceptuel, tout sauf innocent. Alors l'épistémologie permet de construire un cadre conceptuel cohérent qui va servir de support au nécessaire travail de conceptualisation qui précède la conception proprement dite et qui la conditionne profondément.

L'**ÉPISTÉMOLOGIE** pragmatique se caractérise par le refus primordial d'attribuer une validité à ce qui relèverait de l'essentialisme. Cela a des conséquences majeures sur sa manière d'aborder la généricité et la causalité.

L'une des idées centrales qui ont conduit cette thèse est que la conception de la technique, que développe SIMONDON (1958), et, qui nous sert à bâtir la notion de culture technique est profondément liée au refus de l'hylémorphisme, que l'on peut considérer comme une indépendance ontologique des formes vis à vis des objets. SIMONDON (1964) développe également une métaphysique de l'individuation qui sous-tend sa pensée de la technique. Cette métaphysique fonde ce que nous appelons advenialisme ; toute individualité advient par elle même et n'est pas le produit d'une opération préalable à sa genèse.

C'est en cela que le premier principe simondonien est l'indéterminé. La genèse qui s'opère dans cet indéterminé n'est pas un processus qui va produire un individu fini, distinct, mais l'individualité elle même. Dès lors tout être est un événement qui advient² dans le monde. Ce principe n'est donc pas une matière mais le monde en tant qu'il est fait d'événements.

² Dans un sens très proche du *to happen* anglais.

Alors tout être est un événement et toute causalité est un couplage entre différents événements. On voit donc comment la notion d'interaction fonctionnelle que crée CHAUVET (1995), si elle peut paraître contre-intuitive au premier abord, complète cette dimension événementielle de l'être. L'être biologique advient à travers des causes événementielles tandis que l'être technique est fait advenir à travers des causes déterminées. Cela éclaire également la description que FASS (2012) fait des systèmes techniques et biologiques puisque la fonction, qui émerge des spécifications, correspond à un événement. Un système est alors un ensemble d'événements hiérarchiquement organisé dans lequel existent des niveaux hiérarchiques possédant leur propre temporalité et spatialité.

De plus, le refus de l'hylémorphisme va de pair avec un refus de la réification des dimensions cognitives de l'être humain. Cela correspond à ce que nous appelons une psychologie *postcognitiviste*, bien qu'elle ait finalement émergée avant le cognitivisme. Cette psychologie, qui trouve des échos dans la neurologie avec FREEMAN (2000) et EDELMAN (1992), se fonde en partie sur la psychologie écologique de GIBSON (1979) et constitue l'héritage de l'anti-rationalisme du XIX^{ème} siècle.

Cette prise de position découle d'un parti pris fort selon lequel les impasses théoriques posées par la psychologie cognitive sont les mêmes que ceux posés par le rationalisme classique³ et découlent d'une manière erronée de poser les problèmes. Nous avons essayé de décrire comment une pensée postcognitive, notamment dans sa manière d'analyser l'interaction sémiotique, peut considérer la perception sans avoir recours à la représentation ou à une théorie transcendante de la signification.

³ Relation corps/esprit, qualias, représentations mentales,...

On peut ainsi conceptualiser l'humain et la machine selon leurs caractéristiques respectives et un cadre commun. En effet, les différences de nature entre l'un et l'autre se font suivant leur organisation et, à certains niveaux d'échelle, sont poreuses voire inexistantes. Cela permet de considérer le couplage humain(s)-machine(s) comme s'établissant entre deux systèmes pouvant générer du sens l'un à partir de l'autre, ce qui constitue l'interaction sémiotique.

*
**

La conceptualisation maîtrisée de l'humain et de la machine, ainsi que celle de l'interaction sémiotique qui caractérise les systèmes anthropotechniques permet de systématiser et d'abstraire un modèle formel et générique de ces systèmes. Ainsi, l'ergonomie théorique ouvre la voie à une *ergonomie de conception* permettant, à terme, l'obtention de systèmes sûrs par construction.

De la même manière que l'épistémologie pragmatique est un choix d'orientation fort, la fondation d'une ontologie de conception sur la base de la cosmologie simondonienne l'est également. Comme on l'a vu, cette conception repose sur une définition de l'objet qui cofonde individualité et milieu à partir d'une substance indéterminée. C'est cela qui engendre l'impossibilité de distinguer nature et culture sur le plan cosmologique et qui nécessite de remplacer cette dualité par une dualité {Biologique - Technique}, recoupant la dualité {Travail - Œuvre} posée par ARENDT (1958), qui correspond adéquatement à la problématique centrale de l'intégration humain-machine. Cela permet d'envisager la construction d'ontologies en se prémunant de tout essentialisme et surtout des problèmes qui en découlent comme celui des qualités universelles. Ainsi, la genericité est avant tout reproduction des conditions d'individuation ; tous les chats dans un contexte spatio-temporel déterminé sont similaires

⁴ D'un point de vue phylogénétique mais également du point de vue sociotechnique de leurs conditions de vie comme la vaccination, l'accès à une nourriture standardisée, une certaine culture de l'animal de compagnie, etc....

parce qu'ils sont tous engendrés par les mêmes événements⁴ *modulo* certaines fluctuations qui induisent l'identité individuelle.

Il en va des objets techniques comme des chats, à ceci près que l'équivalent de leur phylogenèse tend à être beaucoup plus contrainte par le système de production industrielle. Les qualités universelles sont alors une répétition de motifs par conservation du contexte, dans le biologique et dans la technique. Ce faisant, l'on s'épargne la problématique de la signification de celles-ci, notamment celle des qualités sensibles qui deviennent une donnée locale du couplage {Opérateur - Machine}. Cela permet de comprendre l'intérêt des méthodes de BASTIEN et SCAPIN (1993) et de MIDAS dans lesquelles ce couplage ne contient pas de contenu informationnel. Leur utilité est donc dans la recherche d'une stabilité des relations de couplage dans une situation donnée ce qui constitue ce que nous avons appelé *stabilité sémiotique*.

Dans un contexte écologique, il est primordial de garantir la stabilité sémiotique, puisque c'est cette caractéristique du couplage qui va garantir que l'IHM fait, non seulement, sens mais, surtout, qu'elle génère la signification voulue par le concepteur. De plus, cela ne concerne pas que les propriétés de l'IHM. En effet, la profonde intégration sociotechnique de tout objet technique rend nécessaire de considérer comme faisant partie du système un nombre important d'objets non techniques. Cela impose de considérer comme faisant partie intégrante du système les procédures d'entraînement, la documentation, les pratiques, etc....

Ce sont ces composantes non techniques du système qui vont permettre de fixer la signification d'un événement donné dans un contexte lui aussi donné. Ainsi, le rôle du concepteur est ici double ; il vise, certes, à garantir la stabilité sémiotique du couplage anthropotechnique mais également à programmer le contenu de cette sémiose, non pas en l'encodant de façon absolue mais en modélisant les tendances comportementales, que sont les affordances, afin de pouvoir les utiliser efficacement de façon à modeler le comportement des opérateurs.

En effet, en définitive, l'interaction anthropotechnique dont nous avons mis en évidence les spécificités est descriptible comme un ensemble de comportements, que ceux ci soient des actions de l'opérateur ou bien des perceptions. Concevoir, c'est donc modeler conjointement deux comportements, celui de la machine qui est prédictible et celui de

l'opérateur qui est, au mieux, anticipable. C'est en cela qu'il y a couplage plus qu'interaction, puisque chacun de ces deux objets est de nature différente et que la machine n'agit pas sur l'humain de la même façon que celui-ci l'opère. On l'a dit, il s'agit ici d'une inter-réaction au sens d'une coopération et concevoir sur cette base, ce n'est pas concevoir uniquement un "équivalent technique" de l'opérativité mais aussi la manière dont l'opérateur va manifester cette opérativité.

*

**

Cet usage des systèmes formels ouvre la voie à une réflexion sur la pratique même de l'ergonomie et sur la manière dont elle est susceptible de s'axiomatiser. L'ergonomie théorique doit être ici comprise comme un complément au travail quotidien de l'ergonome "de terrain" au même titre que la physique ou la biologie théorique agissent comme ensembles organisés de connaissances. En cela elle diffère de la recherche en ergonomie, dont elle pourra être le résultat, en cela qu'elle doit nécessairement viser un champ scientifique plus large. L'avènement de ce qu'on a nommé *technosciences* a en effet vu une variété du traitement monodisciplinaire du phénomène technique qui repose sur le principe énoncé par ANDERS (1956) selon lequel toute technique disponible sera nécessairement utilisée un jour. L'on a vu dès lors apparaître une nouvelle manière d'évoquer la technique, non pas abstraitement mais directement corrélée à ses conditions sociétales c'est à dire dans la manière dont elle est le produit de l'interaction d'une production scientifique et des capacités industrielles d'une société. Désormais, à travers les NTIC⁵ l'on a restreint le champ de l'étude de la technique aux dispositifs d'ordre informatique.

⁵ Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication.

Les NTIC donnent raison à SIMONDON (1958) dans la mesure où leur essor repose sur un progrès technique d'une double nature ; d'une part les capacités techniques des systèmes informatiques individuels⁶ permettent des applications nombreuses et d'autre part l'évolution des réseaux de communication permet à ces dispositifs d'être utilisés de façon fondamentalement différente que s'ils n'étaient pas connectés. Dès lors, individuellement ou collectivement, faire usage d'un dispositif issu des NTIC c'est aussi faire usage de ces réseaux constitutifs de pratiques. Dans les faits, cet usage est donc nécessairement sociotechnique par nature.

⁶ e.g. Ordinateur personnel, *Smartphone* et éventuellement *Smartwatch*.

À cet égard, SIMONDON (1958) lorsqu'il théorise l'*humain porteur d'outil* de la machine se rapproche d'ANDERS (1956) et de sa notion d'obsolescence de l'humain, à ceci près qu'il n'est pas aussi pessimiste que ce dernier. Le plaidoyer pour une *mécanologie*, synonyme de technologie, en tant que connaissance des machines, s'éclaire lorsque l'on considère le phénomène technique comme un phénomène "naturel" et non pas culturel. L'objectif de la connaissance technologique de SIMONDON (1958) est de permettre l'établissement d'une culture de la technique propice à une émancipation de l'humain. Ainsi, de la même manière que la technique a permis à l'humain de s'extraire de la nature primitive, la culture technique doit lui permettre d'éviter l'aliénation qui est le risque de la nature moderne. Cette aliénation ne doit pas être conçue comme phénomène économique lié à la possession des forces productives mais comme la relation existentielle de chaque ouvrier en rapport à sa capacité de comprendre les usages de son outillage. Ainsi chez SIMONDON (1958), la pire forme d'avilissement de l'humain pourrait être conçue comme une société qui juxtaposerait les automates opaques ne permettant à ses membres d'uniquement lancer des processus sans exercer aucun contrôle.

Ainsi, la portée de notre manière d'analyser ces interactions ne passe pas uniquement par celle de l'interaction sémiotique.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à cette classe particulière des interactions puisqu'elle conditionne l'usage d'un grand nombre de systèmes à dimension critique et que sa compréhension représente, à ce titre, un enjeu majeur pour leur conception. Cela ne signifie toutefois pas que l'ergonomie théorique doive se borner à n'être qu'une sémiotique de l'interaction. En effet, cette limitation conduirait à de nombreux problèmes, le premier d'entre eux étant l'ignorance de l'existence d'une culture technique qu'il faut comprendre afin de comprendre l'usage. Cette culture technique est extrêmement bien décrite et codifiée dans les domaines aéronautiques ou médicaux mais se manifeste de façon diverse selon les domaines. Ainsi la connaissance du rapport aux objets techniques, en dehors de ses dimensions interactives, est primordiale à la compréhension des usages de ces objets ce qui fait de l'ergonomie théorique une composante de ce que nous avons appelé plus tôt une *anthroponomie du phénomène technique*.

Comme on l'a vu, la position intégrative élargit considérablement l'extension du concept de technique puisqu'elle tend à y introduire des systèmes qui ne sont pas des machines, comme l'organisation socio-technique dans laquelle sont mises en œuvre les machines. En cela, une anthroponomie de la technique aurait pour horizon de réunir et d'unifier l'ensemble des connaissances à ce sujet ce qui permettrait de refonder, en autres et de façon similaire à ce que nous avons tenté de faire ici, l'éthique de la technique. En effet, de la même manière que notre manière de conceptualiser les choses influencent notre manière de les concevoir, elle détermine aussi notre manière de juger ce qu'elles sont et comment les critères éthiques ou moraux de notre société va les juger acceptables.

Dès lors, si les fondements épistémologiques de l'ergonomie théorique doivent permettre de concevoir des systèmes humain(s)-machine(s) sûrs, ils doivent également déboucher sur une technologie permettant de redéfinir les rapports entre l'humain et la technique qui se manifestent dans la sphère arendtienne de l'action, c'est à dire de ce qui est politique et social.

PERSPECTIVES D'APPLICATION

COMME nous l'avons vu en 6.3, MIDAS permet de modéliser certains aspects de l'opérativité qui sont en relation avec la procédure comme la fatigue. Il permet aussi de modéliser certains paramètres de l'interface en leur attribuant empiriquement, par exemple, une certaine saillance ce qui permet de modéliser des problèmes comme la prioritarisation. L'on se trouve ainsi en face d'un modèle *synthétique a posteriori* de l'utilisation d'une machine par un opérateur. Or ce que l'on recherche est une modélisation de l'interaction qui soit également *analytique a priori*. Seule la validation *analytique a priori* confère au modèle la capacité d'établir la *correction par construction* des hypothèses de conception car les modèles synthétiques ne permettent pas d'exclure l'existence de *scenarii* imprévus ou d'erreurs liées à la complexité du système.

BASTIEN et SCAPIN (1993) ont établi un ensemble de règles permettant de valider ou de rejeter une hypothèse d'interface en fonction de ses caractéristiques d'architecture, de comportement et d'évolution. Originellement prévus pour modéliser l'interface d'un logiciel dans un contexte d'informatique grand public⁷, nous avons proposé que leur

⁷ Particulièrement construite autour du triptyque { écran - clavier - souris }

champ d'application puisse être élargi. Cette évolution de la critériologie se fonde sur le changement de paradigme que nous avons proposé et qui voit l'interaction, entendue comme dialogue, remplacée par une cointégration qui est d'ordre sémiotique. Cela nous a permis de relire les critères comme un ensemble de règles permettant de garantir la stabilité sémiotique au sein d'un complexe anthropotechnique et d'en extraire la logique sous-jacente.

Cet ensemble logique ne constitue toutefois, dans la forme qu'il prend en 4.2, qu'un modèle générique de l'*interfacialité* et n'est ainsi que de peu de recours pour le designer. En effet, il ne permet de fournir qu'une analyse négative des interfaces dans la mesure où il ne permet de discerner que celles qui sont utilisables des autres. Il est donc hors de question d'y voir, dans son utilisation isolée, un éventuel outil automatique qui remplacerait le designer humain.

Toutefois, et c'est là la proposition majeure de nos travaux, disposer conjointement d'un modèle de la performance avec MIDAS et d'un modèle formel de l'utilisabilité permet d'entrevoir de nouveaux outils de conception. Comme on l'a vu en 6.3, MIDAS ne dispose pas d'une ontologie de l'interface du système anthropotechnique allant au delà des perspectives anthropométriques. Dès lors, ajouter un module permettant la modélisation ontologique de l'interface permettrait d'étendre le champ d'action de MIDAS aux interactions sémiotiques. Pour être plus précis, il s'agit ici moins de modéliser l'interaction sémiotique *per se* que de modéliser ses conditions d'apparition puisque la critériologie, tout comme MIDAS, ne prennent pas en compte la signification attribuée à un élément isolé de l'interface. Cela tient au fait que MIDAS ne modélise pas les interactions mais le résultat de celles-ci que sont les tâches nécessaires au fonctionnement du système.

Son champ d'application s'en trouverait ainsi élargi en intégrant des systèmes dont le public est moins expert qu'aujourd'hui. Mais avant tout, l'ontologie formelle permettrait d'appliquer à MIDAS des méthodologies issues du développement formel permettant de modéliser le comportement de la partie informatique du système. De la même manière que ces méthodes permettent de d'assurer une correction par construction de leurs objets, l'ontologie formelle, puisqu'elle dispose de règles validables

empiriquement permettrait, à terme, d'assurer l'utilisabilité *a minima* de tout ou partie de l'IHM.

La double modélisation de l'utilisabilité et de la performance de l'utilisateur présente un intérêt dans la simulation HOTL des complexes anthropotechniques. Ces simulations présentent l'intérêt de pouvoir explorer à la fois les systèmes déjà connus et des systèmes hypothétiques, dans des conditions impossibles à retrouver empiriquement. Cela les rend intéressantes car cela permet, comme c'est déjà le cas avec MIDAS pour la performance, d'en faire des outils de simulation probabilistes qui sont bien plus pertinents dans une démarche de conception itérative que la seule validation expérimentale.

Ainsi, en intégrant une ontologie de conception à ces outils, il devient envisageable d'en faire des outils d'aide à la spécification d'IHM dans la mesure où, les mêmes causes entraînant les mêmes effets, il deviendrait possible de comprendre comment certains ensembles de paramètres sont problématiques. Au delà de la vérification d'hypothèses, il serait alors possible de valider formellement des patrons de conception, permettant ainsi d'optimiser certaines phases du design en termes de temps et de qualité.

LIMITES ET PERSPECTIVES

La première limite à ce travail de thèse est relative à sa dimension principielle. En effet, si la dimension épistémologique de nos travaux est primordiale, il a fallu garder à l'esprit que toute théorisation doit ici se faire en vue d'une explicitation du rôle des facteurs humains dans la conception. Il a ainsi fallu couper court à la tentation de systématiser notre analyse épistémologique vers une *philosophie du design* qui n'est pas à propos ici.

Toutefois, l'approche analytique des objets, par leur dimension systémique, de la manière dont nous l'avons abordée, pourrait bénéficier grandement d'une systématisation qui irait dans le sens d'une anthropologie générale et dont ce travail de thèse serait une exemplification de l'application à une problématique centrale de notre société technique.

Conjointement, l'on a vu au chapitre 5 qu'une analyse intégrative de la critériologie de BASTIEN et SCAPIN (1993) permet de la reconstruire, dans

l'optique d'élargir leur portée aux systèmes interactifs actuels et futurs. Cette proposition, bien qu'elle ne change pas foncièrement le fond de la critériologie, les réorganise en suivant l'évolution, que nous prescrivons, d'un dialogue humain(s)-machine(s) à une interaction sémiotique.

Cette nouvelle critériologie reste à valider expérimentalement et devrait permettre de changer le point de vue du concepteur sur les systèmes qu'il analyse. En effet, même si l'on cherchait à conserver le dialogue humain(s)-machine(s), les interfaces basées sur le tactile et les dispositifs mobiles mettent en jeu des aspects extrêmement différents de ceux présents dans les systèmes sur lesquels ont été conçus les critères originaux. La réforme, que nous proposons, est pertinente en cela qu'elle vise à se détacher des modalités de mise en place de l'IHM pour se concentrer sur l'interaction sémiotique.

En sus de cette validation expérimentale, notre approche réformatrice des critères ne vise pas à figer ceux-ci dans leur forme présente. Ainsi, l'actuelle critériologie que nous proposons devra peut-être être augmentée de certains éléments originellement absents des préoccupations de BASTIEN et SCAPIN (1993). De la même manière, l'interaction sémiotique est le constituant central de l'interaction humain(s)-machine(s) aujourd'hui et si nous avons généralisé la critériologie à tous les systèmes techniques, nous n'avons pas traité le cas d'éventuels systèmes "non sémiotiques".

Enfin, notre proposition d'ajouter à MIDAS une couche ontologique, qui suivrait les principes épistémologiques et cosmologiques que nous avons développé ici, nécessite de trouver le formalisme adéquat à la modélisation dynamique du facteur humain. Nous pensons que la structure ontologique que nous avons construite dans la figure 5.1 (page 208) constitue un bon candidat pour en fournir la base. Son but n'est pas de modéliser, directement, l'interaction sémiotique, mais ses conditions de possibilité liées aux facteurs humains, et elle ne permet donc pas de s'assurer que l'utilisation d'un élément d'interface donné dans un contexte donné produira une signification spécifique. Elle permet, par contre, de s'assurer que les conditions dans lesquelles l'opérateur est censé attribuer une signification particulière à un événement se reproduisent de façon stéréotypique selon les besoins.

L'exemple que nous avons choisi de développer et qui porte sur la notion de *charge de travail* représente un cas relativement particulier

de convergence entre la critériologie et MIDAS, puisque tous deux thématisent cette difficulté centrale de la conception. C'est pour cette raison que nous l'avons choisi car, en effet, s'il s'avère possible de répliquer les résultats des modules actuels de MIDAS cela accrédirait grandement notre approche.

De plus, la profonde intrication des critères, et la manière dont nous les concevons, fait que l'ontologie formelle n'a pas pour horizon de se circonscrire à la description de la charge de travail. Son objectif est beaucoup plus global que cela et il serait extrêmement intéressant d'aborder le développement d'une couche ontologique à MIDAS sous cet angle, dans la mesure où l'influence entre critères est parfois importante. Limiter l'ontologie de conception à une unique dimension des critères risquerait, alors, de se révéler être une modélisation insuffisante des conditions de l'interaction sémiotique.

*
**

COMME nous l'avons vu à plusieurs reprises dans cette thèse, la problématique d'intégration des facteurs humains ne se limite pas à l'IHM et au rapport de l'œuvre au travail. La dimension sociotechnique, liée à la sphère de l'action a été ici mise à la marge dans la mesure où sa contribution au problème de l'interaction sémiotique est essentiellement liée aux aspects organisationnels du système humain(s)-machine(s).

Ainsi, concevoir un système c'est aussi concevoir la structure des relations interindividuelles entre les opérateurs de ce système, structure qui se déploie entre différents niveaux d'échelle sociotechnique. Cette structure va par exemple dicter la latitude d'action des opérateurs dans certaines circonstances spécifiques et l'organisation de la chaîne de commandement qui peut en découler.

Couplée à la modélisation de l'interaction sémiotique et à la biologie intégrative, cette dimension sociotechnique de l'interaction humain(s)-machine(s) permettrait de rendre exhaustive notre compréhension du facteur humain et sa prise en charge satisfaisante. Il conviendra donc, dans le futur, d'intégrer ces considérations sociotechniques à une ergonomie théorique visant à combler le hiatus existant actuellement entre ergonomie physique, ergonomie cognitive et ergonomie organisationnelle

qui visent toutes trois à améliorer les rapports entre l'être humain et ses constructions.

Références

- ABRIAL, J.-R., LEE, M. K., NEILSON, D., SCHARBACH, P. & SØRENSEN, I. H. (1991). The B-method. In *International Symposium of VDM Europe* (p. 398-405). Springer. (Cf. p. 222).
- ACADÉMIE FRANÇAISE. (1935). *Dictionnaire de l'Académie* (huitième édition). Paris - Hachette. (Cf. p. 16, 95).
- ANAXIMANDRE DE MILET. (1991). *Anaximandre. Fragments et témoignages* (M. CONCHE, Trad.). Paris - Presses Universitaires de France. (Cf. p. 111, 113).
- ANDERS, G. (1956). *Die Antiquiertheit des Menschen 1 : Über die Seele im Zeitalter der zweiten industriellen Revolution*. Munchen - C.H. Beck. Trad. dans *L'obsolescence de l'homme : Sur l'âme à l'époque de la deuxième révolution industrielle*. (2002) (C. DAVID, Trad.). Editions de l'Encyclopédie des Nuisances(cf. p. 241, 242)
- ANDERSON, J. R., MATESSA, M. & LEBIERE, C. (1997). ACT-R : A theory of higher level cognition and its relation to visual attention. *Human-Computer Interaction*, 12(4), 439-462. (Cf. p. 211).
- ANDERSON, J. R. (1976). *Language, Memory and Thought*. Hillsdale, NJ - Lawrence Erlbaum Associates. (Cf. p. 212).
- ANDERSON, J. R., BOTHELL, D., BYRNE, M. D., DOUGLASS, S., LEBIERE, C. & QIN, Y. (2004). An Integrated Theory of the Mind An Integrated Theory of the Mind An Integrated Theory of the Mind. *Psychological Review*, 111(4). (Cf. p. 212).
- ARENDT, H. (1958). *The Human Condition*. Chicago - The University of Chicago Press. Trad. dans *Condition de l'Homme Moderne*. (2012) (G. FRADIER, Trad.). In P. RAYNAUD (Éd.), *L'Humaine Condition*. Paris - Gallimard(cf. p. 34, 38, 137, 239)
- ARISTOTE. (p. d.-a). *Περὶ ζώων γενέσεως*. Trad. dans *De la génération des animaux*. (2014) (P. LOUIS, Trad.). In P. PELLEGRIN (Éd.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 125)

- ARISTOTE. (p. d.-b). *Περὶ Ψυχῆς* (R. BODĒUS, Trad.). Trad. dans De l'âme. (2014) (R. BODĒUS, Trad.). In P. PELLEGRIN (Éd.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 71)
- ARISTOTE. (p. d.-c). *Φύσις*. Trad. dans Physique. (2014). In P. PELLEGRIN (Éd. & Trad.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 82, 105, 124, 125)
- ATLAN, H. (1979). *Entre le cristal et la fumée : Essai sur l'organisation du vivant*. Paris - Seuil. (Cf. p. 96).
- AUGUSTIN D'HIPPONE. (426). *De Civitate Dei contra paganos*. Trad. dans *La Cité de Dieu*. (1994) (J.-C. ESLIN, Trad.). Paris - Seuil(cf. p. 67)
- BACH, C. & SCAPIN, D. (2003). Ergonomic Criteria Adapted to Human Virtual Environment Interaction. In *Proceedings of the 15th Conference on L'Interaction Homme-Machine* (p. 24-31). IHM '03. doi :10.1145/1063669.1063674. (Cf. p. 164, 177)
- BACON, F. (1620). *Novum Organum* (M. MALHERBE & J. M. POUSSEUR, Trad.). Londini - Apud Joannem Billium, Typographum Regium. Trad. dans MALHERBE, M. & POUSSEUR, J. M. (Éd.). (1986). *Novum Organum*. Paris - Presses Universitaires de France(cf. p. 17)
- BAILLY, A. (1895). *Dictionnaire grec-français*. Paris - Hachette. (Cf. p. 16).
- BANDA, C., BUSHNELL, D., CHEN, S., CHIU, A., CONSTANTINE, B., MURRAY, J., ... STAVELAND, L. (1991). *Army-NASA aircrew/aircraft integration program : Phase 4 A(3)I Man-Machine Integration Design and Analysis System (MIDAS) software detailed design document*. National Aeronautics et Space Administration. (Cf. p. 210).
- BARCENILLA, J. & BASTIEN, J. M. C. (2009). L'acceptabilité des nouvelles technologies : quelles relations avec l'ergonomie, l'utilisabilité et l'expérience utilisateur ? *Le travail humain*, 72(4), 311-331. (Cf. p. 52).
- BARTHÉLÉMY, J.-H. (2014). Simondon, ou le symptôme d'une époque. Chronique d'une redécouverte. *Hermès, La Revue*, (3), 191-196. (Cf. p. 108).
- BASTIEN, J. M. C. & SCAPIN, D. L. (1993). *Critères ergonomiques pour l'évaluation d'interfaces utilisateurs*. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique. (Cf. p. 147, 148, 153, 156, 163, 164, 190, 192, 195, 196, 209, 223, 229, 240, 243, 245, 246).
- BELAVAL, Y. (1985). *Leibniz : initiation à sa philosophie*. Paris - Librairie philosophique J. Vrin. (Cf. p. 76).
- BENVENISTE, E. (1963). *Problèmes de linguistique générale*. Paris - Gallimard. (Cf. p. 169).
- BERGSON, H. (1902). *Histoire de l'idée de temps : Cours au Collège de France 1902-1903*. Presses universitaires de France. (Cf. p. 67).

- BERGSON, H. (1904). *L'évolution du problème de la liberté : Cours au Collège de France 1904-1905*. Presses universitaires de France. (Cf. p. 67).
- BERGSON, H. (1908). *L'Évolution Créatrice*. Paris - Alcan. Voir FRANÇOIS, A. (Éd.). (2013). *L'Évolution Créatrice*. Paris - Presses Universitaires de France (cf. p. 33, 34, 63)
- BERNARD, C. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris - JB Baillière et Fils. (Cf. p. 28, 79-82).
- BERNARD, C. (1879). *Leçons sur les phénomènes de la vie commune aux animaux et aux végétaux*. Paris - JB Baillière et Fils. (Cf. p. 47, 81).
- BERNOULLI, J. (1718). Remarques sur ce qu'on a donné jusqu'ici de solutions des problèmes sur les isoperimètres. *Histoire de l'Académie Royale des Sciences [de Paris], Mémoires de Mathématiques et Physique*, 1, 2. (Cf. p. 72).
- BERTALANFFY, L. (1968). *General System Theory*. New York : New York - Georges Braziller. (Cf. p. 29, 45, 116).
- BERTALANFFY, L. v. (1968). *General System Theory*. New York : New York - Georges Braziller. (Cf. p. 38, 45, 84, 86).
- BERTHELOT, M. (1885). *Les origines de l'alchimie*. Paris - Georges Steinheil. (Cf. p. 107).
- BICHAT, M. F. X. (1800). *Traité des membranes en général et de diverses membranes en particulier*. Paris - Richard, Caille et Ravier. (Cf. p. 78, 80).
- BJØRNER, D. & EIR, A. (2010). *Compositionality : Ontology and mereology of domains*. Berlin - Springer. (Cf. p. 220).
- BLACKLEDGE, J. T. (2003). An introduction to relational frame theory : Basics and applications. *The Behavior Analyst Today*, 3(4), 421. (Cf. p. 93).
- BLANCHONETTE, P. (2010). *Jack human modelling tool : A review*. DEFENCE SCIENCE et TECHNOLOGY ORGANISATION VICTORIA (AUSTRALIA) AIR OPERATIONS DIV. (Cf. p. 216).
- BLOECHLE, W. K. & SCHUNK, D. (2003). Micro saint sharp simulation software : micro saint sharp simulation software. In *Proceedings of the 35th conference on Winter simulation : driving innovation* (p. 182-187). Winter Simulation Conference. (Cf. p. 211).
- BOEHM, B. (1988). A spiral model of software development and enhancement. *Computer*, 21(5), 61-72. (Cf. p. 50, 51, 53).
- BOEHM, B. & HANSEN, W. (2000). *Spiral development : Experience, principles, and refinements*. Carnegie-Mellon Univ Pittsburgh PA Software Engineering Inst. (Cf. p. 50).
- BONTEMS, V. (2008). Quelques éléments pour une épistémologie des relations d'échelle chez Gilbert Simondon. Individuation, Technique, et Histoire. *Appareil*, (2). (Cf. p. 114).

- BOOHER, H. (2003). Introduction : Human System Integration. (Chap. 1). Hoboken, NJ - John Wiley & Sons. (Cf. p. 48, 147).
- BOULANGER, J.-C. (2003). *Les inventeurs de dictionnaires : de l'eduba des scribes mésopotamiens au scriptorium des moines médiévaux*. Ottawa - University of Ottawa Press. (Cf. p. 167).
- BRANGIER, E. & ROBERT, J.-M. (2014). L'ergonomie prospective : fondements et enjeux. *Le travail humain*, 77(1), 1-20. (Cf. p. 22).
- CANGUILHEM, G. (1952). *La connaissance de la vie*. Paris - Hachette. (Cf. p. 29, 114).
- CHAUVET, G. (1993a). Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. I. The increase of complexity by self-association increases the domain of stability of a biological system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 339(1290), 425-444. (Cf. p. 86, 106, 138, 139).
- CHAUVET, G. (1993b). Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. II. The concept of non-symmetry leads to a criterion of evolution deduced from an optimum principle of the (O-FBS) sub-system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 339(1290), 445-461. (Cf. p. 106, 139).
- CHAUVET, G. (1993c). Hierarchical functional organization of formal biological systems : a dynamical approach. III. The concept of non-locality leads to a field theory describing the dynamics at each level of organization of the (D-FBS) sub-system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B : Biological Sciences*, 339(1290), 463-481. (Cf. p. 106).
- CHAUVET, G. (1995). *La vie dans la matière : le rôle de l'espace en biologie*. Paris - Flammarion. (Cf. p. 29, 38, 87, 138, 139, 144, 161, 238).
- CHAUVET, G. (2006). *Comprendre l'organisation du vivant et son évolution vers la conscience*. Paris - Vuibert. (Cf. p. 106).
- CHOMSKY, N. (1956). Three models for the description of language. *IRE Transactions on information theory*, 2(3), 113-124. (Cf. p. 97).
- CHOMSKY, N. (1959). A review of BF Skinner's Verbal Behavior. *Language*, 35(1), 26-58. (Cf. p. 97).
- COMBRONDE, C. (1999). Les platoniciens de l'art à la Renaissance. *Revue philosophique de Louvain*, 97(2), 268-288. (Cf. p. 67).
- DARWIN, C. (1859). *On the Origin of Species by Means of Natural Selection*. London - John Murray. Trad. dans *L'origine des espèces*. (2008) (E. BARBIER, Trad.). Paris - Garnier Flammarion (cf. p. 33, 83)

- de GANDT, F. (1986). Les "Mécaniques" attribuées à Aristote et le renouveau de la sciences des machines au XVI^e SIÈCLE. *Les Études philosophiques*, (3), 391-405. (Cf. p. 105).
- de LA FONTAINE, J. (1668). *Fables choisies, mises en vers par M. de La Fontaine*. Paris. (Cf. p. 72).
- de LA METTRIE, J. O. (1748). *L'Homme Machine*. Leyde. (Cf. p. 72).
- de SAUSSURE, F. (1916). *Cours de linguistique générale* (C. BALLY, L. J. CALVET, A. RIEDLINGER & A. SECHEHAYE, Éd.). Paris - Payot. (Cf. p. 93).
- DESCARTES, R. (1637). *Discours de la Méthode*. Voir RENAUT, L. (Éd.). (2016). *Discours de la Méthode*. Paris - Garnier Flammarion (cf. p. 76)
- DESCARTES, R. (1641). *Meditationes de Prima Philosophia*. Trad. dans *Méditations métaphysiques*. (1992) (M. BEYSSADE & J.-M. BEYSSADE, Trad.). Paris - Garnier Flammarion (cf. p. 27, 73, 101, 128)
- DESCARTES, R. (1644). *Principia philosophiae*. Trad. dans *Principes de la Philosophie*. (1993) (ABBÉ PICOT, Trad.). Paris - Librairie philosophique J. Vrin (cf. p. 126, 128)
- DESCARTES, R. (1649). *Les passions de l'âme*. Paris - Librairie philosophique J. Vrin. voir RODIS-LEWIS, G. (Éd.). (1994). *Les passions de l'âme*. Paris - Librairie philosophique J. Vrin (cf. p. 77)
- DEWEY, J. (1930). *The Quest For Certainty : A study of the relation of knowledge and action*. London - George Allen et Unwin. Trad. dans *La quête de certitude. Une étude de la relation entre connaissance et action*. (2014) (P. SAVIDAN, Trad.). Paris - Gallimard (cf. p. 131)
- DIELS, H. (1903). *Die Fragmente der Vorsokratiker* (W. KRANZ, Éd.). Hildesheim - Weidmann. (Cf. p. 140).
- DIOGÈNE LAËRCE. (p. d.). *Λαερτίου διογένους βίοι καὶ γνῶμαι τῶν ἐν φιλοσοφίᾳ εὐδοκίμησάντων καὶ τῶν ἐκάστη αἵρέσει ἀρεσκόντων*. Trad. dans GOULET-CAZÉ, M.-O. (Éd.). (1999). *Vies et Doctrines des Philosophes Illustres*. Paris - Le Livre de Poche (cf. p. 32)
- DREYFUS, H. L. (1972). *What computers can't do : A critique of artificial intelligence*. New York - Harper & Row. (Cf. p. 30, 133).
- DREYFUS, H. L. (2006). Overcoming the myth of the mental. *Topoi*, 25(1), 43-49. (Cf. p. 38).
- DREYFUS, H. L. (2007). Why Heideggerian AI failed and how fixing it would require making it more Heideggerian. *Philosophical psychology*, 20(2), 247-268. (Cf. p. 133).
- EDELMAN, G. M. (1992). *Bright Air, Brilliant Fire : On the matter of the Mind*. New York - Basic Books. Trad. dans *Biologie de la conscience*. (1992) (A. GERSCHENFELD, Trad.). Paris - Odile Jacob (cf. p. 38, 106, 238)

- EDELMAN, G. M. (2004). *Wider than the sky : The phenomenal gift of consciousness*. New Haven, Co - Yale University Press. Trad. dans *Plus vaste que le ciel : Une nouvelle théorie générale du cerveau*. (2004) (J.-L. FIDEL, Trad.). Odile Jacob (cf. p. 106)
- ENGELBART, D. C. (1962). *Augmenting human intellect : a conceptual framework*. (Cf. p. 163).
- ERNOUT, A. & MEILLET, A. (1932). *Dictionnaire étymologique de la langue latine*. Paris - Klincksieck. (Cf. p. 16).
- FASS, D. (2002). *Base de connaissances multimodales et esthétique de la connaissance, aide à l'action et réalité virtuelle : théorie et expériences* (thèse de doct., Université Nancy I). (Cf. p. 29, 38).
- FASS, D. (2006). Rationale for a model of human systems integration : The need of a theoretical framework. *Journal of Integrative Neuroscience*, 5(03), 355-372. (Cf. p. 145).
- FASS, D. (2012). Augmented Human Engineering : A Theoretical and Experimental Approach to Human Systems Integration. In B. COGAN (Éd.), *Systems Engineering* (Chap. 12). InTech Open Access Publisher. (Cf. p. 30, 38, 144, 145, 192, 221, 238).
- FASS, D. & CHAUVET, G. (2006). The Mathematical theory of integrative physiology : a fundamental framework for human system integration and augmented human design. *ENACTIVE/06*, 135. (Cf. p. 29, 144).
- FASS, D. & GECHTER, F. (2015). Towards a Theory for Bio-Cyber Physical Systems Modelling. In *LNCS - Digital Human Modeling and applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management : Human Modelling (Part I)* (p. 245-255). Berlin - Springer. (Cf. p. 87, 224).
- FITZGERALD, J. S., LARSEN, P. G. & VERHOEF, M. (2007). Vienna development method. *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, 1-11. (Cf. p. 222).
- FODOR, J. A. (1975). *The language of thought*. Cambridge, Ma - Harvard University Press. (Cf. p. 37, 106).
- FODOR, J. A. (1983). *The modularity of mind : An essay on faculty psychology*. Cambridge, Ma - MIT Press. (Cf. p. 106, 212).
- FOUCAULT, M. (1963). *Naissance de la clinique : Une archéologie du regard médical*. Paris - Presses Universitaires de France. (Cf. p. 79).
- FOYLE, D. C. & HOOEY, B. L. (Éd.). (2007). *Human performance modeling in aviation*. Boca Raton, Fl - CRC press. (Cf. p. 211).
- FREEMAN, W. J. (2000). A neurobiological interpretation of semiotics : meaning, representation, and information. *Information Sciences*, 124(1-4), 93-102. (Cf. p. 238).

- FREGE, G. (1892). Über Sinn und Bedeutung. *Zeitschrift für Philosophie und philosophische Kritik*. Trad. dans Sens et dénotation. (1971). In C. IMBERT (Éd. & Trad.), *Écrits logiques et philosophiques*. Paris - Seuil. Trad. dans Sens et dénotation. (1971). C. IMBERT (Éd. & Trad.), *Écrits logiques et philosophiques*. Paris - Seuil(cf. p. 167)
- GAFFIOT, F. (1934). *Dictionnaire latin-français*. Paris - Hachette. (Cf. p. 16, 31).
- GALISON, P. (1994). The ontology of the enemy : Norbert Wiener and the cybernetic vision. *Critical inquiry*, 21(1), 228-266. (Cf. p. 94).
- GIBSON, J. J. (1961). Ecological optics. *Vision research*, 1(3), 253-262. (Cf. p. 134, 168).
- GIBSON, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston - Houghton Mifflin. (Cf. p. 56).
- GIBSON, J. J. (1977). The theory of affordances. In R. E. SHAW & J. BRANSFORD (Éd.), *Perceiving, Acting and Knowing*. Mahwah, NJ - Lawrence Erlbaum Associates. (Cf. p. 134, 167, 169).
- GIBSON, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston : Boston - Houghton Mifflin. Trad. dans *L'approche écologique de la perception visuelle* (1^{re} éd.). (2011) (O. PUTOIS, Trad.). Bellevaux - Editions Dehors(cf. p. 38, 106, 133, 169, 238)
- GIREL, M. (2014). L'expérience comme verbe ? *Education permanente*, 198(1), 23-34. (Cf. p. 36).
- GLASER, R. (1985). *The Nature of Expertise. Occasional Paper No. 107*. Ohio State Univ., Columbus. National Center for Research in Vocational Education. (Cf. p. 217).
- GORE, B. F. (2011). Man-machine integration design and analysis system (MIDAS) v5 : Augmentations, motivations, and directions for aeronautics applications. In P. C. CACCIABUE, M. HJÄLMDAHL, A. LUEDTKE & C. RICCIOLI (Éd.), *Human modelling in assisted transportation* (p. 43-54). Berlin - Springer. (Cf. p. 210, 213, 225).
- GORE, B. F., HOOEY, B. L., WICKENS, C. D. & SCOTT-NASH, S. (2009). A computational implementation of a human attention guiding mechanism in MIDAS v5. *Lecture Notes in Computer Science*, 5620, 237-246. (Cf. p. 215, 216, 222).
- GORE, B. F., HOOEY, B. L., WICKENS, C. D., SOCASH, C., GOSAKAN, M., GACY, M., ... FOYLE, D. C. (2011). Workload as a performance shaping factor in MIDAS v5. In *20th Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS) Conference*. (Cf. p. 227).
- GRUBER, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge acquisition*, 5(2), 199-220. (Cf. p. 222).
- GUEROULT, M. (1954). Métaphysique et physique de la force chez Descartes et chez Malebranche. *Revue de Métaphysique et de Morale*, 59(1), 1-37. (Cf. p. 128).

- HAMILTON, M. & ZELDIN, S. (1976). Higher order software—A methodology for defining software. *IEEE Transactions on Software Engineering*, (1), 9-32. (Cf. p. 49).
- HART, S. G. & STAVELAND, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index) : Results of empirical and theoretical research. In *Advances in psychology* (T. 52, p. 139-183). Elsevier. (Cf. p. 226).
- HARVEY, W. (1628). *Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus*. Francfort. (Cf. p. 77, 78).
- HASSENZAHL, M. (p. d.). *The thing and I : Understanding relationship between user and product*. 2003. (Cf. p. 52).
- HAYES, S. C., BARNES-HOLMES, D. & ROCHE, B. (2001). *Relational frame theory : A post-Skinnerian account of human language and cognition*. Berlin - Springer. (Cf. p. 93).
- HEIDEGGER, M. (1927). *Sein und Zeit*. Halle - Max Niemeyer. Trad. dans *Être et Temps*. (1990) (F. VEZIN, Trad.). Paris - Gallimard (cf. p. 89, 109, 110)
- HOBBS, T. (1651). *Leviathan*. London. Trad. dans *Léviathan*. (2000) (G. MAIRET, Trad.). Paris - Gallimard (cf. p. 76)
- HOBBS, A., ADELSTEIN, B., O'HARA, J. & NULL, C. (2008). Three principles of human-system integration. In *Proceedings of the 8th Australian Aviation Psychology Symposium* (p. 8-11). (Cf. p. 48, 57, 146).
- HUME, D. (1793). *An inquiry concerning human understanding*. Londres. Trad. dans BEYSSADE, M. (Éd.). (2006). *Enquête sur l'entendement humain* (A. LEROY, Trad.). Paris - Garnier Flammarion (cf. p. 28)
- INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION. (2017). Official Website. Récupérée 4 janvier 2017, à partir de <http://www.iea.cc/whats/index.html>. (Cf. p. 21)
- ISO 9241-210 : 2010. *Ergonomics of human system interaction-Part 210 : Human-centred design for interactive systems*. (2009). International Standardization Organization (ISO). Switzerland. (Cf. p. 25, 26, 49, 50).
- ISO/IEC 40500 :2012. *Technologies de l'information -- Règles pour l'accessibilité des contenus Web (WCAG) 2.0*. (2012). International Standardization Organization (ISO). Switzerland. (Cf. p. 190).
- JACOB, F. & MONOD, J. (1961). Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins. *Journal of molecular biology*, 3(3), 318-356. (Cf. p. 84).
- JAMES, W. (1884). What is an emotion ? *Mind*, 9(34), 188-205. (Cf. p. 31).
- JAMES, W. (1890). *The principles of psychology*. New York - Holt. (Cf. p. 55).
- JAMES, W. (1904a). Does Consciousness Exist ? *The Journal of philosophy, psychology and scientific methods*, 1(18), 477-491. (Cf. p. 91).

- JAMES, W. (1904b). What Pragmatism Means. In *Pragmatism*. (1907). Trad. dans *Le Pragmatisme*. (2011). Paris - Flammarion(cf. p. 159)
- JAMES, W. (1909). *A Pluralistic Universe : Hibbert Lectures at Manchester College on the Present Situation in Philosophy*. New York - Longmans, Green, et Co. Trad. dans *Philosophie de l'expérience : Un univers pluraliste*. (2007) (S. GALETIC, Trad.). Paris - Empêcheurs de Penser en Rond(cf. p. 219)
- JEANGÈNE VILMER, J.-B. (2007). La prudence de Descartes face à la question de l'infini en mathématiques. *Philosophiques*, 34(2), 295-316. (Cf. p. 73).
- JOULE, J. P. (1843). On the calorific effects of magneto-electricity, and on the mechanical value of heat. *Philosophical Magazine*, 23(152), 263-276. (Cf. p. 80).
- JP 5-0, Joint Planning -. (2017). US Joint Chiefs of Staff. (Cf. p. 210).
- KANT, I. (1787). *Kritik der reinen Vernunft* (Seconde). Trad. dans Critique de la raison pure. (1980). In A. DELAMARRE & F. MARTY (Éd.), *Œuvres complètes* (T. 1). Paris - Gallimard(cf. p. 28, 99, 101)
- KANT, I. (1790). *Kritik der Urteilkraft*. Trad. dans Critique de la faculté de juger. (1985). In A. DELAMARRE & F. MARTY (Éd.), *Œuvres complètes* (T. 2). Paris - Gallimard(cf. p. 31)
- KOYRÉ, A. (1933). Copernic. *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger*, 116, 101-118. (Cf. p. 126).
- KUHN, T. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago - The University of Chicago PressUniversity of Chicago Press. Trad. dans *La Structure des Révolutions Scientifiques*. (1972). Paris - Flammarion(cf. p. 45, 103, 131)
- KURZWEIL, R. (2005). *The singularity is near : When humans transcend biology*. New York - Penguin. Trad. dans *Humanité 2.0*. (2007) (A. MESMIN, Trad.). Paris - M21. Trad. dans *Humanité 2.0*. (2007) (A. MESMIN, Trad.). Paris - M21(cf. p. 30)
- LAVOISIER, A. L., HASSENFRATZ, J.-H., de FOURCROY, A. F. et al. (1787). *Méthode de nomenclature chimique*. Cuchet. (Cf. p. 130).
- LE MOIGNE, J.-M. & MORIN, E. (2001). *L'Intelligence de la Complexité*. Paris - L'Harmattan. (Cf. p. 96).
- LEBIERE, C., ARCHER, R., WARWICK, W. & SCHUNK, D. (2005). Integrating modeling and simulation into a general-purpose tool. In *Proceedings of the 11th International Conference on Human-Computer Interaction* (p. 22-27). (Cf. p. 212).
- LEROI-GOURHAN, A. (1964). *Le Geste et la Parole : Technique et Langage*. Editions Albin Michel. (Cf. p. 118).
- LIDDELL, H. G. & SCOTT, R. (1896). *An intermediate Greek-English lexicon : founded upon the seventh edition of Liddell and Scott's Greek-English lexicon*. Harper & Brothers. (Cf. p. 70).

- LOCKETT, J. F. & POWERS, J. (2003). Human factors engineering methods and tools. In H. R. BOOHER (Éd.), *Handbook of human systems integration* (p. 463-496). Hoboken, NJ - John Wiley & Sons. (Cf. p. 24).
- LUCRETIVS CARUS, T. (p. d.). *De rerum natura*. Trad. dans *De la nature*. (1997). Paris - Flammarion (cf. p. 36, 81)
- MAGENDIE, F. (1809). *Examen de l'action de quelques végétaux, sur la moelle épinière*. (Cf. p. 79).
- MAHLKE, S. (2008). User experience of interaction with technical systems. (Cf. p. 52-54).
- MALPIGHI, M. (1661). *De pulmonibus observationes anatomicae*. (Cf. p. 78).
- MARR, D. (1982). *Vision : A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. Cambridge, Ma - MIT Press. (Cf. p. 106).
- MCCARTHY, J. & HAYES, P. J. (1981). Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. In *Readings in artificial intelligence* (p. 431-450). New York - Elsevier. (Cf. p. 134).
- MCCULLOCH, W. S. & PITTS, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*, 5(4), 115-133. (Cf. p. 106).
- MÉRY, D., SCHÄTZ, B. & WASSYNG, A. (2014). The Pacemaker Challenge : Developing Certifiable Medical Devices (Dagstuhl Seminar 14062). *Dagstuhl Reports*, 4(2), 17-37. (Cf. p. 225).
- MÉRY, D. & SINGH, N. K. (2012). Critical systems development methodology using formal techniques. In *3rd International Symposium on Information and Communication Technology - SoICT 2012* (p. 3-12). SoICT '12 - Proceedings of the Third Symposium on Information and Communication Technology. doi :10.1145/2350716.2350720. (Cf. p. 222, 223)
- MINSKY, M. (1988). *Society of mind*. New York - Simon et Schuster. (Cf. p. 98).
- MOLICH, R. & NIELSEN, J. (1990). Improving a human-computer dialogue. *Communications of the ACM*, 33(3), 338-348. (Cf. p. 26, 164).
- MORGAN, T. H. (1915). *The mechanism of Mendelian heredity*. New York - Holt. (Cf. p. 83).
- MSC Apollo 13 investigation team. Panel 1 - *Spacecraft incident investigation. Volume 1 - Anomaly investigation Final report*. (1970). NASA. (Cf. p. 47).
- NASA. (2016). What is Human System Integration ? Récupérée 14 juillet 2017, à partir de https://humanfactors.arc.nasa.gov/awards_pubs/hf101.php. (Cf. p. 45)
- NAZIN, R. & FASS, D. (2015). Human Machine Epistemology Survey. In V. G. DUFFY (Éd.), *Digital Human Modeling. Applications in Health, Safety, Ergonomics and*

- Risk Management : Human Modeling : 6th International Conference, DHM 2015, Held as Part of HCI International 2015, Los Angeles, CA, USA, August 2-7, 2015, Proceedings, Part I*. Springer International Publishing Switzerland. (Cf. p. 90, 103).
- NEWELL, A. (1994). *Unified theories of cognition*. Cambridge, Ma - Harvard University Press. (Cf. p. 212, 229).
- NEWTON, I. (1684). *De motu corporum in gyrum*. (Cf. p. 128).
- NEWTON, I. (1687). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. London. (Cf. p. 129).
- NEWTON, I. (1704). *Opticks; Or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. London - William et John Innys. (Cf. p. 129).
- NORMAN, D. (1988). *The psychology of everyday things*. New York - Basic Books. (Cf. p. 167, 169).
- PAVLOV, I. P. (1927). *Conditioned Reflexes. An Investigation of the Physiological Activity of the Cerebral Cortex* (G. ANREP, Trad.). London. (Cf. p. 92).
- PERROW, C. (1984). *Normal Accidents : Living with High Risk Technologies*. Princeton, NJ - Princeton University Press. (Cf. p. 45-47).
- PLATON. (p. d.-a). *Μένων*. Trad. dans Ménon. (2008) (M. CANTO-SPERBER, Trad.). In L. BRISSON (Éd.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 64)
- PLATON. (p. d.-b). *Παρμενίδης*. Trad. dans Parménide. (2008). In L. BRISSON (Éd. & Trad.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 74)
- PLATON. (p. d.-c). *Τίμαιος*. Trad. dans Timée. (2008). In L. BRISSON (Éd. & Trad.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 219)
- PLATON. (p. d.-d). *Φαῖδρος*. Trad. dans Phèdre. (2008). In L. BRISSON (Éd. & Trad.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 101)
- PLATON. (p. d.-e). *Φαῖδων*. Trad. dans Phédon. (2008) (M. DIXSAUD, Trad.). In L. BRISSON (Éd.), *Oeuvres Complètes*. Paris - Flammarion(cf. p. 124)
- POINCARÉ, H. (1887). Sur les hypothèses fondamentales de la géométrie. *Bulletin de la Société mathématique de France*, 15, 203-216. (Cf. p. 114).
- Présentation de l'Orientation et de la S&T (POST) 2014-2019*. (2017). Direction Générale de l'Armement. (Cf. p. 22).
- PRIGOGINE, I. & WIAME, J.-M. (1946). Biologie et thermodynamique des phénomènes irréversibles. *Experientia*, 2(11), 451-453. (Cf. p. 116).
- PUTNAM, H. (1980). Philosophy and our mental life. *Readings in philosophy of psychology*, 1, 134-143. (Cf. p. 98).
- PUTNAM, H. (1992). La nature des états mentaux. *Les Études philosophiques*, 323-335. (Cf. p. 106).
- PYLYSHYN, Z. (1984). *Computation and cognition : Toward a theory for cognitive science*. Cambridge, Ma - MIT Press. (Cf. p. 98, 106).

- QUINE, W. V. (1950). *Methods of Logic*. New York - Holt. Trad. dans *méthodes de logique*. (1984) (M. CLAVELIN, Trad.). Paris - Armand Colin(cf. p. 15)
- ROCHETTE, B. (1995). Du grec au latin et du latin au grec Les problèmes de la traduction dans l'antiquité gréco-latine. *Latomus*, 54(Fasc. 2), 245-261. (Cf. p. 68).
- ROCO, M. & BAINBRIDGE, W. (2002). *Converging technologies for improving human performances*. National Science Foundation. (Cf. p. 23).
- ROGOVIN, M. (1979). *Three Mile Island : A report to the commissioners and to the public*. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). (Cf. p. 46).
- ROOK, P. (1986). Controlling software projects. *Software Engineering Journal*, 1(1), 7-16. (Cf. p. 50, 52).
- ROSENBLUETH, A., WIENER, N. & BIGELOW, J. (1943). Behavior, purpose and teleology. *Philosophy of science*, 10(1), 18-24. (Cf. p. 95, 106).
- ROYCE, W. (1970). Managing the development of large systems : Concepts and techniques. In *9th International Conference on Software Engineering*. ACM (p. 328-38). (Cf. p. 50, 51).
- RUMELHART, D. E. & MCCLELLAND, J. L. (1986). *Parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition*. Cambridge, Ma - MIT Press. (Cf. p. 106).
- RUSSO, F. (1966). Leibniz et la notion de fonction. *Archives de Philosophie*, 29(4), 553-569. (Cf. p. 76).
- RUYSER, R. (1954). *La cybernétique et l'origine de l'information*. Paris - Flammarion. (Cf. p. 106).
- SCAPIN, D. L. & BASTIEN, J. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behaviour & information technology*, 16(4-5), 220-231. (Cf. p. 26, 30, 38, 163, 211).
- SCHWANN, T. (1839). *Mikroskopische Untersuchungen über die Uebereinstimmung in der Struktur und dem Wachsthum der Thiere und Pflanzen*. Sander. (Cf. p. 79).
- SEARLE, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and brain sciences*, 3(3), 417-424. (Cf. p. 30).
- SEARLE, J. R. (1990). Is the brain a digital computer ? In *Proceedings and addresses of the american philosophical association* (T. 64, 3, p. 21-37). JSTOR. (Cf. p. 98).
- SHANNON, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, 5(1), 3-55. (Cf. p. 121, 122).
- SHNEIDERMAN, B. (2010). *Designing the user interface : strategies for effective human-computer interaction*. Pearson Education India. (Cf. p. 164).
- SIMONDON, G. (1956). Fondements de la psychologie contemporaine. In : *Sur la psychologie*. (2015). Paris - Presses Universitaires de France(cf. p. 91)

- SIMONDON, G. (1958). *Du mode d'existence des objets techniques*. Paris - Aubier. Voir *Du mode d'existence des objets techniques*. (2012). Paris - Aubier(cf. p. 27, 34, 38, 46, 47, 49, 56, 59, 94, 108, 115-122, 133, 134, 138, 146, 220, 238, 241, 242)
- SIMONDON, G. (1964). *L'individu et sa genèse physico-biologique : l'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*. Paris - Presses Universitaires de France. (Cf. p. 108-110, 112-116, 238).
- SIMONDON, G. (1965). *Imagination et invention : 1965-1966*. Paris - Presses Universitaires de France. (Cf. p. 56).
- SIMONDON, G. (1970). Naissance de la technologie. In *Sur la technique : 1953 - 1983*. (2014). Paris - Presses Universitaires de France(cf. p. 107)
- SKINNER, B. (1976). *About Behaviorism*. Vintage Books. (Cf. p. 106).
- SKINNER, B. F. (1938). *The behavior of organisms : an experimental analysis*. New York - Appleton-Century-Crofts. (Cf. p. 92).
- SKINNER, B. F. (1953). *Science and human behavior*. New York - Simon et Schuster. (Cf. p. 92).
- SKINNER, B. F. (1957). *Verbal behavior*. New York - Appleton-Century-Crofts. (Cf. p. 92, 97).
- SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE PHILOSOPHIE. (1926). *Vocabulaire technique et critique de la philosophie* (A. LALANDE, Éd.). Société française de Philosophie. voir LALANDE, A. (Éd.). (2006). *Vocabulaire technique et critique de la philosophie*. Paris - Presses Universitaires de France(cf. p. 16, 30, 95)
- STAQUET, A. (2011). Comment Hobbes tente de rendre son matérialisme acceptable dans les appendices du Léviathan. *Les Dossiers du Grihl*. (Cf. p. 76).
- TEIGER, C. & FALZON, P. (1995). Construire l'activité. *Performances humaines et techniques, Hors Série*, 34-40. (Cf. p. 137, 210).
- TERENTIUS AFER, P. (p. d.). *Andria*. Trad. dans L'Andrienne. (2003) (J. MAROUZEAU, Trad.). In, *Comédies, tome 1. Andrienne - Eunuque*. Paris - Les Belles Lettres(cf. p. 36)
- THOMAS D'AQUIN. (1273). *Summa theologiae*. Trad. dans *Somme théologique*. (2000). Paris - Editions du Cerf(cf. p. 125)
- THORNKIDE, E. (1898). Animal intelligence : An experimental study of the associative processes in animals. *Psychological Monographs*, 2(8). (Cf. p. 92).
- TOGNAZZINI, B. (2003). *First principles of interaction design*. (Cf. p. 164).
- TURING, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *J. of Math*, 58, 345-363. (Cf. p. 30, 98).
- VESALIUS, A. (1543). *De Humani Corporis Fabrica*. Bâle - Johannes Oporinus. (Cf. p. 75, 77).
- VON LINNÉ, C. (1793). *Systema naturae per regna tria naturae*. (Cf. p. 31).

- VON NEUMANN, J. (1945). *First Draft of a Report on the EDVAC*. (Cf. p. 30).
- WATSON, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological review*, 20(2), 158. (Cf. p. 91).
- WATSON, J. B. (1925). *Behaviorism*. New York - W. W. Norton et company, inc. (Cf. p. 106).
- WHITEHEAD, A. N. (1920). *The Concept of Nature*. Cambridge, Ma - Cambridge University Press. Trad. dans *Le concept de nature* (2e édition revue et augmentée). (2006) (J. DOUCHEMENT, Trad.). Paris : Paris - Librairie Philosophique Vrin (cf. p. 102)
- WICKENS, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159-177. (Cf. p. 227).
- WICKENS, C. D., MCCARLEY, J. S., ALEXANDER, A. L., THOMAS, L. C., AMBINDER, M. & ZHENG, S. (2008). Attention-situation awareness (A-SA) model of pilot error. *Human performance modeling in aviation*, 213-239. (Cf. p. 216).
- WIENER, N. (1948). *Cybernetics : Control and Communication in the Animal and the Machine*. New York : Hoboken, NJ - John Wiley & Sons. Trad. dans *La cybernétique : Information et régulation dans le vivant et la machine*. (2014) (N. V. RONAN LE ROUX Robert Vallée, Trad.). Paris : Seuil (cf. p. 27, 32, 45, 95, 106)
- WIENER, N. (1949). *Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time series*. Cambridge, Ma - MIT Press. (Cf. p. 94).
- WING, J. M. (1990). A specifier's introduction to formal methods. *Computer*, 23(9), 8-22. (Cf. p. 222).
- WUNDT, W. M. (1874). *Grundzüge de physiologischen Psychologie*. W. Engelman. (Cf. p. 31).

Résumé

La conception sûre et le développement maîtrisé des systèmes humain(s)-machines(s) est un enjeu majeur pour l'ensemble de la société et, spécialement, dans les domaines critiques comme les domaines militaire, aérospatial et médical qui sont amenés à évoluer conjointement, grâce aux progrès réalisés par l'automatisation. Parallèlement, les techniques disponibles pour assurer la mise en place de solutions répondant à ces besoins sont également en constante progression concernant leurs dimensions de puissance, efficacité énergétique, miniaturisation, ce qui correspond à la notion de convergence Nanotechniques-Biotechniques-Informatique-Sciences Cognitives.

Tout cela rend nécessaire d'avoir une ergonomie théorique, non pas au sens parfois entendu d'un détachement de la pratique mais au sens d'une ergonomie fondée sur un cadre conceptuel et formel permettant de rendre intelligibles les méthodologies et normes utilisées à travers des principes généraux.

Ainsi, l'ergonomie théorique n'est pas une théorie de l'ergonomie mais une théorie de l'anthropotechnique, qui cherche à développer une méthodologie et une épistémologie pragmatique, propre à apporter les fondements conceptuels à ce qui existe aujourd'hui et à permettre le développement futur de l'ergonomie comme champ scientifique. Elle repose sur l'idée centrale qu'à la base de toute Interface Humain(s)-Machine(s) se produit une interaction particulière ; l'interaction sémiotique.

Cette interaction particulière, propre aux être vivants, est à la base de l'intégration entre l'individu et son environnement. C'est elle qui lui permet d'agir dans le monde en produisant de la signification à partir de la perception sensible. En envisageant l'humain comme un système biologique intégré, au sens de Chauvet, c'est à dire comme un système dont le comportement est le produit des couplages implicites à différents niveaux de structure, il est possible de fonder un paradigme postcognitivistique en psychologie générale. Le propre de ce paradigme est qu'il permet d'envisager le comportement de l'individu à partir de sa biologie et de façon non réductionniste.

À partir des travaux de Chauvet et de Fass, il est possible d'établir une modélisation mathématique de ces phénomènes biologiques qui permette de formaliser les spécifications d'un système technique, à partir des exigences liées aux facteurs humains. Grâce à ce cadre conceptuel, il est possible d'analyser et de réformer certains outils précieux pour l'ergonome comme la critériologie de Bastien et Scapin dont nous proposons une généralisation à tous les systèmes techniques. Cette critériologie a pour fonction originelle de permettre qu'un système interactif réponde à un ensemble fondamental d'exigences liées aux facteurs humains. En la généralisant et en la formalisant, il devient possible d'envisager une modélisation des paramètres fondamentaux de l'interaction sémiotique.

Cette approche aboutit dans une ontologie de conception, qui a pour ambition d'être un cadre formel de modélisation de l'interaction humain(s)-machine(s). Nous en proposons une application à MIDAS, outil de modélisation de la performance humaine, développé par la NASA. Le propos de cette ontologie est de permettre la modélisation de l'interaction de façon simultanée à la modélisation du comportement de l'utilisateur ce qui permet de mettre en évidence quels sont les paramètres hamartogènes d'une hypothèse de conception.

Ainsi, l'usage d'ontologies de conception ouvre la voie à la construction de modèles formels, corrects par construction, de l'interaction humain(s)-machine(s) et de ses conditions optimales de mise en place, permettant ainsi une conception plus assurée des systèmes à dimension critique.

Summary

The safe design and controlled development of human(s)-machine(s) systems is a major challenge for society as a whole and, especially, in critical areas such as the military, aerospace and medical fields that are brought to evolve, thanks to the progress made by automation. At the same time, the techniques available to ensure the implementation of solutions that meet these needs are also constantly increasing with regard to their power dimensions, energy efficiency and miniaturization, which corresponds to the notion of convergence between Nanotechniques-Biotechniques-Informatics-Cognitive Sciences.

All this makes necessary to have theoretical ergonomics, not in the sense sometimes understood of a detachment of the practice but in the sense of ergonomics based on a conceptual and formal framework making possible to render the methodologies and norms used through general principles intelligible.

Thus, theoretical ergonomics are not a theory of ergonomics but a theory of anthropotechnics, which seeks to develop a methodology and a pragmatic epistemology, capable of providing the conceptual foundations for what exists today and to allow the future development of ergonomics as a scientific field. It is based on the central idea that at the base of any Human(s)-Machine(s) Interface occurs a particular interaction ; semiotic interaction.

This particular interaction, specific to living beings, is at the basis of the integration between the individual and his environment. It is what allows it to act in the world, by producing meaning from sensible perception. By considering the human as an integrated biological system, in the sense of Chauvet, as a system whose behavior is the product of implicit couplings at different levels of structure, it is possible to found a postcognitive paradigm in general psychology. The peculiarity of this paradigm is that it makes possible to envisage the behavior of the individual from his biology and in a non-reductionist way.

From the work of Chauvet and Fass, it is possible to establish a mathematical modeling of these biological phenomena, allowing to formalize the specifications of a technical system, based on the requirements related to human factors. Thanks to this conceptual framework, it is possible to analyze and reform some valuable tools for the ergonomist like the criterium of Bastien and Scapin for which we propose a generalization to all technical systems. The primary function of this criteriology is to allow an interactive system to meet a fundamental set of requirements related to human factors. By generalizing and formalizing it, it becomes possible to envisage a modeling of the fundamental parameters of the semiotic interaction.

This approach results in a design ontology, which aims to be a formal framework for modeling human(s)-machine(s) interactions. We propose an application to MIDAS, a human performance modeling tool developed by NASA. The purpose of this ontology is to allow the modeling of the interaction simultaneously to the modeling of the behavior of the user which makes it possible to highlight what are the hamartogenic parameters of a given hypothesis of conception.

Thus, the use of design ontologies opens the way to the construction of formal models, correct by construction, of the human(s)-machine(s) interaction and its optimal conditions of implementation, allowing a more assured design of critical systems.