



HAL
open science

Interaction technique et individuation

Catherine Letondal

► **To cite this version:**

Catherine Letondal. Interaction technique et individuation. Interface homme-machine [cs.HC]. Université de Toulouse, 2022. tel-03857778

HAL Id: tel-03857778

<https://enac.hal.science/tel-03857778>

Submitted on 20 Dec 2022

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.



HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES

Discipline : Informatique

Spécialité : Interaction Humain-Machine

Proposée par

Catherine LETONDAL

Interaction technique et individuation

soutenue le 24 mars 2022

Jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Pierre CUBAUD	- CNAM (Paris)
	Stéphane HUOT	- INRIA (Lille)
	Pascal SALEMBIER	- UTT (Troyes)
<i>Présidente :</i>	Nadine COUTURE	- ESTIA (Bidart)
<i>Examineurs :</i>	Michel BEAUDOUIN–LAFON	- Université Paris XI
	Stéphane CONVERSY	- ENAC (Toulouse)
	Yannick PRIÉ	- Université de Nantes
<i>Invité :</i>	Didier BAZALGETTE	- DGA

20 décembre 2022

Table des matières

1	Introduction	9
1.1	Du fil conducteur au projet de recherche	9
1.2	Historique	10
1.3	Remarque sur l'organisation du manuscrit	11
2	Etat de l'art	13
2.1	Introduction	13
2.1.1	Autour du concept d'interaction comme individuation .	14
2.1.2	Organisation de ce chapitre	16
2.2	Profils de théories de l'IHM	16
2.3	Définir l'interaction ?	23
2.4	Au-delà de l'interaction ?	29
2.4.1	La technique comme médiation	29
2.4.2	Interaction et co-évolution	38
2.5	Matérialité de l'interaction	41
2.5.1	Matérialité et composition	43
2.5.2	Forme numérique et matérialité de l'interaction	45
2.5.3	Interaction tangible et incarnée et matérialité	49
2.5.4	L'hylémorphisme	50
2.6	IHM et philosophie	53
2.6.1	Philosophie de la technique	53
2.6.2	Développement de la philosophie en IHM et en design .	55
2.6.3	Penser l'usage ? Retour vers une techno-logie de l'IHM.	56
2.7	La philosophie de Simondon pour l'interaction ?	59
2.7.1	Réalité relationnelle transductive et individuation . . .	60
2.7.2	Critique de l'hylémorphisme	62
2.7.3	L'interaction humain-machine dans la techno-esthétique	65
2.7.4	Le mode d'existence des objets techniques	69

2.7.5	Interaction et conception (1) : l'interaction individuante	73
2.8	Résumé	75
3	Ecrire l'interaction	77
3.1	Les projets	78
3.1.1	Ecriture et recherche en biologie	78
3.1.2	Ecriture et composition musicale	80
3.2	Ecriture et geste	81
3.2.1	Geste et écriture musicale	81
3.2.2	Les gestes avec stylo pour interagir dans l'activité scientifique	82
3.3	Du geste à la réflexivité	83
3.3.1	Trace de l'activité scientifique et production de signes	85
3.3.2	Ralentir l'interaction pour composer	86
3.3.3	Ecritures transductives	87
3.3.4	Persistance de l'écriture	88
3.4	Ecriture et mise en relation	88
3.4.1	Listes et tableaux	88
3.4.2	Créer des relations entre interactions	90
3.4.3	Ecriture et programmation	91
3.4.4	Synthèse rhétorique	94
3.5	Ecriture instrument et écriture objet	96
3.6	Résumé	97
4	Physicaliser l'interaction	99
4.1	Interaction tangible et sécurité aérienne	99
4.1.1	La sécurité telle qu'elle se fait	99
4.2	Strip'TIC : des objets-surfaces manipulables	102
4.2.1	Les gestes des contrôleurs aériens et la sécurité aérienne	102
4.2.2	Cohérence et cognition distribuée dans un système de strips tangibles augmentés	105
4.2.3	Transduction et concrétisation dans le strip électronique	107
4.3	Airtius : le danger des surfaces tactiles	108
4.3.1	Dimensions physiques de l'activité de pilotage	109
4.3.2	Design de prototypes	112
4.3.3	Evaluation	115
4.3.4	Analyse du concept	116
4.4	Discussion	119

4.4.1	Tangibilité et information	119
4.4.2	Tangibilité et valeurs : sécurité, sens et écologie	121
4.5	Résumé	122
5	Voir l'interaction	123
5.1	Le geste matériel dans le cockpit	123
5.1.1	Statuts du geste matériel	124
5.1.2	Problématique du geste tactile pour la collaboration	129
5.1.3	Révéler les interactions par des représentations graphiques	130
5.2	Voir l'interaction distante	133
5.2.1	Le contexte du Single Pilot Operation	133
5.2.2	Conscience mutuelle dans la collaboration temps réel à distance	135
5.3	Transparence et opacité dans la collaboration	138
5.4	Résumé	140
6	Créer l'interaction	141
6.1	Ingénierie des systèmes interactifs	141
6.1.1	Combiner les méthodes d'IHM et d'ingénierie système	142
6.1.2	Vers une méthode pour intégrer l'ingénierie dans un projet "design"	145
6.1.3	Le concepteur comme utilisateur	147
6.2	Analyse de sept processus participatifs	149
6.2.1	Espace de description des processus	150
6.2.2	Synthèse des descriptions de processus	151
6.3	Compréhensions de l'invention	153
6.3.1	Phylogénèse et ontogénèse de l'objet technique	154
6.3.2	Dynamicité transductive dans la conception	154
6.3.3	Les prototypes comme artefacts polymorphes	160
6.3.4	Interaction et conception (2) : conception dans l'interaction	163
6.4	Résumé	165
7	Perspectives	167
7.1	Le concept de travers�e pour l'interaction avec et sans surface	167
7.2	IHM et philosophie	170
7.3	IHM et �cologie	172

7.3.1	Etat de l'art sur IHM et écologie	172
7.3.2	Utilisabilité ou éthique?	173
7.3.3	Nécessité d'une approche globale	174
7.3.4	L'IHM comme approche complexe	176
7.3.5	Une autre transparence	181
7.3.6	Interaction et conception (3) : l'interaction citoyenne .	186
7.4	Résumé	188
8	Conclusion	189
	Appendices	191
A	Analyses de l'écriture	193
A.1	Geste et écriture musicale	193
A.2	Persistance de l'écriture	194
A.3	Mise en relation dans la dimension temporelle	196
B	Analyses Strip'TIC	199
B.1	Structure des processus temporels dans l'ATC	199
B.2	Encodage physique des processus temporels	200
B.3	Expérimentation d'outils temporels mixtes	202
B.4	Espace de représentation et d'interaction reposant sur les strips physiques	203
C	Analyses Airtius	207
C.1	Dimensions physiques de l'activité des pilotes de ligne	207
C.2	Evaluation de Multiplié	209
D	Le geste matériel dans le cockpit	211
D.1	Dimensions des gestes des pilotes de ligne	211
D.2	Designs proposés aux pilotes	213
D.3	Analyse des designs auprès des pilotes	213
E	Analyses de processus	217
E.1	Processus analysés	217
E.1.1	Paperoles et Musink	217
E.1.2	graphenda	219
E.1.3	Strip'TIC	221
E.1.4	Ecritures mêlées pour les techniciens de maintenance .	222

E.1.5	Medusa	223
E.1.6	STAMP	226
E.1.7	Airtius	228
E.2	Caractéristiques des processus analysés	236
F	Approches systémiques	239
G	Verbatims	241
G.1	STAMP	241
	Bibliographie	280

Résumé Ce manuscrit décrit mes travaux de recherche en IHM depuis la soutenance de ma thèse en 2001 il y a 20 ans. Les questions de recherche en IHM que j'ai explorées portent sur l'écriture interactive, la physicalisation des surfaces tactiles, la conscience mutuelle en collaboration séparée, et la conception participative. Autour de ces thèmes bien identifiées, je propose une réflexion plus générale sur ce qu'on peut appeler momentanément la matérialité de l'interaction, c'est-à-dire à la fois sur le processus de prise de forme dans la conception et sur les individuations à l'œuvre dans l'interaction. A travers le sujet de l'écriture interactive, qu'il s'agisse d'un travail avec les compositeurs contemporains, les contrôleurs aériens, les biologistes ou les techniciens de maintenance, ce sont les questions de l'expressivité mais aussi de la trace qui sont explorés, entraînant une exploration de l'interaction réflexive mais éclairant également la programmation comme une forme moderne de l'écriture. C'est la question de l'incarnation qui est étudiée à travers l'exploration de modalités d'externalisations de gestes, de rythmes et de structures temporelles en contexte opérationnel, menant à la conception de dispositifs incorporant différentes sortes de matérialité, telles que par exemple des surfaces pliables en accordéon. Comme le problème de la conscience collaborative pose la question de *voir* l'interaction, c'est encore une fois une certaine forme de matérialité qui doit être supposée. C'est enfin la question du processus d'individuation par lequel j'essaye de comprendre le principe théorique de la conception participative, qui fait naître l'invention de l'interaction, dans la continuité de ce que j'ai appelé programmation participative durant ma thèse. L'individuation technique est la question commune qui se dégage de ces diverses expériences de pensée technique : individuation par réification, par instrumentation, par transduction ou par conception expli-

cite. Pour mener cette réflexion, j'ai choisi de faire appel à quelques concepts de la philosophie grecque, de la phénoménologie, de la post-phénoménologie ou de la théorie ontologique de Simondon. Ce qui résulte du raisonnement que j'ai tenté de construire est à la fois un plaidoyer pour considérer l'IHM comme une partie de la science et non comme une science appliquée, et des propositions, grâce au principe de continuité entre interaction et conception, pour une approche complexe de l'IHM à l'écologie.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Du fil conducteur au projet de recherche

Ce manuscrit s'est d'abord donné comme objectif de synthétiser les travaux de recherche que j'ai menés depuis 20 ans, c'est-à-dire depuis ma thèse soutenue en 2001, et de présenter des perspectives de recherche pour la suite. En termes de synthèse, si j'ai abordé des sujets très différents depuis la programmation participative par l'utilisateur final durant la thèse, puis l'écriture interactive, l'interaction tangible, et aujourd'hui la conscience mutuelle dans la collaboration séparée, le thème qui m'a-t-il semblé reste constant est sous une forme ou une autre un lien essentiel entre l'interaction et la conception. Ce lien peut se décliner sous différentes formes, que j'aborde dans ce manuscrit, comme celui de la matérialité de l'interaction, celui de l'opacité, ou de la conception participative, qui toutes consistent à faire émerger la conception de l'interaction, c'est-à-dire à créer du réel, *individuer*, dans le flux de l'interaction.

La conscience de ce lien a émergé ces dernières années en grande partie à travers la lecture des textes du philosophe Gilbert Simondon, l'ébauche de quelques articles scientifiques, et la participation à des séminaires sur la philosophie de la technique. J'ai donc souhaité à l'occasion de la rédaction de ce mémoire mobiliser des ressources conceptuelles pour construire un raisonnement à propos de ce lien, raisonnement qui reste encore parfois exploratoire. Il s'agit essentiellement de propositions, faites d'hypothèses, de questions ouvertes, et d'éléments de réponse tirés de mes travaux ou de la littérature, et de quelques conclusions.

Ces propositions tournent autour de deux idées principales. La première est que, en tant qu’enseignant, chercheur, concepteur et citoyen, nous avons besoin de comprendre de manière unifiée le fonctionnement de l’interaction et la conception, comme deux modalités d’une technicité qu’il faut aujourd’hui peut-être repenser un peu. Cette compréhension passe par quelques repères sur ce qu’on appelle parfois la matérialité de l’interaction qui ne va pas sans la question de la forme ou de la prise de forme. La deuxième idée est que l’interaction humain-machine est une partie de la science d’aujourd’hui, et non une science appliquée, et que pour appuyer cette idée et la développer, ne serait-ce que pour nourrir la première, il est utile d’avoir recours à des théories de l’interaction technique en dehors des théories utilisées en IHM, notamment en philosophie de la technique et en anthropologie.

Les chapitres 3 à 6 concernent les travaux de recherche et les projets auxquels j’ai participé, le chapitre 5 concernant plus particulièrement deux des thèses que j’ai co-dirigées. Ces chapitres sont encadrés par un chapitre 2 initial assez détaillé que j’ai intitulé ”Etat de l’art” parce qu’il réunit les éléments théoriques dont j’ai pensé utile de rappeler l’essentiel pour appuyer mes propositions, et par un chapitre 7 ”Perspectives” qui tire quelques conclusions de ce parcours.

1.2 Historique

Les différents thèmes sur lesquels j’ai travaillé ont aussi un lien plus historique et contingent. J’ai commencé la recherche autour de la programmation par l’utilisateur pendant ma thèse, qui s’est déroulée à l’Institut Pasteur où ce problème se posait, thèse à la suite de laquelle j’ai d’ailleurs appliqué mes réflexions pour la conception et la direction d’une formation annuelle de 4 mois en informatique pour les biologistes, formation dont j’ai assuré la direction pendant 7 ans avec Katja Schuerer et Benno Schwikowski. Ce thème m’a ensuite amenée à l’IRCAM puisque les compositeurs y sont aussi des programmeurs, mais le sujet sur lequel j’ai en réalité travaillé avec eux a été, inspiré par les travaux de Wendy Mackay sur les cahiers de laboratoire des biologistes [MPL⁺02], celui du stylo numérique pour la composition musicale contemporaine. L’exploration des interactions utilisant le stylo numérique m’a ensuite amenée à l’interaction tangible par le biais d’un projet sur les strips des contrôleurs aériens [HLL⁺12a] [LHL⁺13] [CHL⁺13]. Enfin l’interaction tangible m’a amenée aux surfaces tangibles, puisque entre le strip

papier le cockpit tactile la question tourne autour des matérialisations possibles d'un objet lisse et plat. Enfin, dans la suite logique de ce projet sur les surfaces tactiles dans le cockpit est arrivée la question du geste tactile avec la thèse de Valentin Becquet, qui, ayant développé la problématique de la construction de la conscience mutuelle en situation d'interaction tactile co-localisée, a conduit assez naturellement à cette problématique en situation distante dans le cadre du Single Pilot Operation, qui est le sujet de thèse de Maxime Bardou. La programmation par l'utilisateur final posait directement les questions autour de la conception participative de systèmes interactifs, mais d'autres projets ont été l'occasion d'y revenir, notamment à l'ENAC où ce thème est majeur.

1.3 Remarque sur l'organisation du manuscrit

Ce manuscrit comporte une Annexe assez importante dans laquelle j'ai reporté autant que possible les éléments descriptifs qui pourraient alourdir la lecture mais qui restent ainsi disponibles pour mieux comprendre tel ou tel aspect.

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de préciser les éléments théoriques qui me semble-t-il permettent d'approfondir la conceptualisation des thèmes de recherche sur lesquels j'ai travaillé. Si ce chapitre s'intitule "Etat de l'*art*" c'est bien en raison de son caractère "technique" même s'il s'agit de technique conceptuelle, théorique voire philosophique. Une question se pose cependant d'emblée. Après l'*utilisation* de ces concepts dans les chapitres suivants, pour mieux décrire les phénomènes autour des différents projets, il restera à déterminer ce que l'on peut faire de ces analyses. Leur but est une meilleure "compréhension" conceptuelle, mais qu'est-ce que "comprendre" ? Ce qui est recherché est un positionnement de l'IHM par rapport à des sources d'information prises dans d'autres domaines du savoir : on y trouve une complétude, un cadre général. Mais ce qu'on y cherche en réalité aussi, c'est presque toujours un sens, et la compréhension vise ce sens. Comme le montre Simondon [Sim58] (voir à ce sujet l'explication très claire qu'en donne Loeve [Loe16] dans un ouvrage collectif "Simondon et l'invention du futur [Bon16a]), l'objectif d'une description scientifique des phénomènes techniques ne peut échapper à une réflexion sur le sens de la technique, c'est-à-dire sur les valeurs et les normes, d'où l'idée qu'il propose d'axiologie. L'article de Mackay & Fayard [MF97] sur les liens entre sciences et design fournit potentiellement une explication sur ce problème : il y a d'un côté les sciences naturelles, qui cherchent à découvrir et établir des faits vrais sur le monde, et d'un autre côté les disciplines du design et de l'ingénierie qui ont pour

objectif de créer une autre partie du monde, dite artificielle, qu'on ne va pas juger vraie ou fausse mais bonne ou mauvaise. Alors pourquoi viser un *savoir* sur une partie du monde que nous créons nous-mêmes et au sujet de laquelle il s'agit juste d'établir des valeurs (comme par exemple l'utilité ou la beauté)? D'ailleurs, nous sommes en principe déjà savants de cette partie du monde puisque comme inventeurs, ingénieurs, designers nous en *connaissons* bien déjà tous les éléments et les processus de création? "Découvrir" l'artificiel n'aurait ainsi aucun sens pour la science. On peut néanmoins deviner que ce n'est pas si simple, car il reste bien des aspects à comprendre et connaître, tant du côté des éléments - la "matière" comme "ce dont est faite une chose" (voir la section 2.5) - que du côté des processus - processus cognitifs, processus d'ingénierie, processus sociaux - qui sont réalisés.

Dans ce manuscrit, je me propose d'essayer de garder le cap sur l'aspect descriptif. Mais une autre question se pose : en quoi ce caractère descriptif peut-il prétendre à statut scientifique? C'est le risque annoncé si l'on en croit déjà les philosophes grecs quant au statut du logos de la technique ou bien Simondon : "Rien ne prouve en effet que la réalité technique puisse être adéquatement connue par des concepts" [Sim58] p 228 - et c'est un débat complexe qui est aujourd'hui développé dans le domaine des technosciences. Ce qui est proposé peut cependant être identifié comme une démarche de proposition et de génération d'hypothèses : tout comme dans un processus de conception, il y a des phases de créativité et des phases de choix et d'évaluation. Disons que ce travail se positionne du côté de la créativité.

Mais l'objectif est tout de même plus précis. A un premier niveau, je souhaite développer l'hypothèse d'un lien quasi-génétique entre interaction et conception, avec un recours à la pensée de Simondon et en m'appuyant sur des exemples pris dans nos recherches. A un second niveau, je tente d'aborder la question du rôle de l'IHM face au problème actuel du devenir technique de l'humain en utilisant cette hypothèse. Cette discussion soutient les perspectives de recherche présentées dans le chapitre 7.

2.1.1 Autour du concept d'interaction comme individuation

Le concept d'interaction fédère les travaux récents à la recherche d'une théorie unifiant le domaine de l'interaction homme-machine [LEJ17] [Wib17] [Cha12] [MC15] [Pay90] ainsi que les travaux sur le design [BL04]. Mon but

n'est pas pour autant de discuter ces définitions ni d'en proposer une mais plutôt de d'analyser un besoin conceptuel de mieux comprendre ce qu'on manipule comme phénomènes et comme objets, ce qui se passe, lorsqu'on conçoit des systèmes interactifs. J'ai choisi de m'intéresser à un concept, celui d'individuation, qui prétend décrire tout ce qui advient, naît, arrive, se dit, se pense, et la formulation de ce concept qui m'a semblé pertinente pour parler de l'interaction est celle de Gilbert Simondon, tant à travers son analyse de l'individuation comme un phénomène au coeur de l'être [Sim05], que dans sa philosophie de la technique [Sim58] avec notamment dans l'utilisation qu'il en fait pour expliquer la nature des objets techniques, la relation humain-machine, et l'invention, avec des outils plus fins comme les notions de transduction, de métastabilité, d'image, de concrétisation.

Mon hypothèse principale est qu'il est nécessaire de penser l'interaction et la conception en même temps, dans l'idée que les deux procèdent de mécanismes similaires voire activés conjointement. Il y a à cela au moins deux raisons, selon qu'on parte de la conception ou de l'interaction. Si on part de la conception de systèmes interactifs, la question est de comprendre pourquoi, pour bien concevoir des systèmes interactifs, il faut de l'interaction. En effet, les méthodes de conception reconnues aujourd'hui pour les systèmes interactifs, la conception participative et le prototypage rapide, sont des méthodes qui consistent à concevoir par l'interaction, et j'aimerais en clarifier les raisons. Ce point sera développé dans le dernier chapitre, sur la conception (chapitre 6, section 6.3.4). Si on part de l'interaction, on observe que la conception y est tapie sous plusieurs formes. Mon expérience de l'interaction est qu'à différentes échelles, et avec différents points de vue, celle-ci est en effet presque par nature générative, c'est-à-dire source d'éléments et de situations d'évolution technologique, d'innovation, et de conception.

C'est surtout sur la nature génétique et dynamique du phénomène d'individuation, avec notamment l'intégration du déplacement, du mouvement, du geste qui s'y effectuent, que je compte pour développer cet aspect. Si ce concept m'a paru pertinent, c'est donc parce qu'il permet de décrire le champ de l'interaction personne-système, et c'est le cas pour la trajectoire que j'y ai tracée, comme le cadre de phénomènes de production dynamique toujours à la frontière de deux états des choses. Ainsi, je vais tenter de me référer au concept d'individuation à propos de thèmes en apparence assez différents, tels que l'interface, l'interaction, l'écriture, la conception participative, les surfaces transformables.

2.1.2 Organisation de ce chapitre

Il est difficile de présenter le cadre conceptuel qui m'intéresse, proposer une réflexion sur le lien qui unit l'interaction et la conception, sans d'abord commencer par me situer par rapport aux théories de l'IHM (section 2.2), et faire un point sur les théories de l'interaction, concept élu, unique et unifiant, bien que mal défini [HO17], de toute la communauté de l'IHM (section 2.3). La section 2.4 décrit une variété de réflexions qui veulent aller au-delà du concept d'interaction, que ce soit pour en souligner l'insuffisance quand il s'agit d'analyser les relations humain-système, ou pour penser la co-évolution qui s'y produit. Je propose également de faire le point sur la question de la matérialité de l'interaction qui à mon avis nourrit directement la réflexion sur l'individuation (2.5). Il m'a semblé ensuite utile de faire un point sur les positionnements respectifs de la philosophie de la technique et de l'IHM, qui s'ignorent largement (comme le remarque Fallman [Fal11]), mais qui pourtant ont beaucoup en commun : j'y trouve notamment des arguments pour justifier de faire appel à un concept aussi général et ontologique que celui d'individuation. La dernière section (2.7) est consacrée à une présentation d'une partie des concepts de Simondon : individuation, transduction (2.7.1), techno-esthétique (2.7.3), les concepts plus liés à la conception étant présentés dans le chapitre 6 (section 6.3.2). D'autres concepts empruntés à des travaux philosophiques, tels que celui de rétention tertiaire de Stiegler [Sti94], de surface de Stroll [Str88] ou de synthèse corporelle de Merleau-Ponty [MP45], seront invoqués dans ce document mais seront introduits dans le chapitre concerné.

2.2 Profils de théories de l'IHM

L'objectif de cette section est de positionner ma réflexion par rapport aux théories qu'on rencontre en IHM, tels que notamment décrits par Rogers [Rog04][Rog12]¹. Comme l'illustre la table 2.1, la manière la plus courante de caractériser les théories est de décrire leur capacité à informer la conception, que ce soit pour orienter la compréhension des besoins et de l'activité, évaluer, ou proposer des cadres de conception. Pour situer les réflexions proposées dans ce manuscrit, je propose des critères [Rog12] qui permettraient d'en faire une sorte de typologie, ou du moins d'en dégager des profils.

1. Halverson a également proposé une classification pour le CSCW [Hal02]

Si la légitimité d'une théorie pour l'IHM est selon un accord tacite et non questionné de pouvoir informer la conception [MC15], il y a en réalité plusieurs manières de différencier les théories utilisées sans se référer à la conception.

Théories externes. On peut par exemple déjà distinguer les théories selon qu'elles existent ou non *indépendamment de la conception*. Les théories telles que la cognition distribuée, la psychologie écologique [Gib86][VR90][Vic95] ou la théorie de l'activité présentent un intérêt en elles-mêmes, indépendamment du fait qu'elles puissent être utilisées pour soutenir la conception, avec à l'autre extrême les théories de type framework de conception. Par exemple la psychologie écologique décrit les contraintes écologiques, c'est-à-dire les structures du monde extérieur qui guident les actions plutôt que celles qui sont déterminées par des processus cognitifs internes, mais elle est pertinente pour comprendre le fonctionnement humain (ou animal) sans qu'il soit question de conception.

Théories de l'interaction. Un autre type de différence entre des théories utilisées en IHM est de voir à quel point ou à quel niveau elles concernent *l'interaction* : la théorie de l'action située ou l'ethnométhodologie considèrent l'interaction à un niveau plutôt organisationnel, tandis que la cognition distribuée ou la théorie de l'activité s'intéressent à l'interaction humain-technique plus spécifiquement au niveau des artefacts. Le cycle de l'action concerne l'interaction en général, alors que les dimensions cognitives de Green sont un cadre très détaillé distinguant des catégories d'interaction sur le plan cognitif. Quant aux théories prédictives telles que Keystroke ou GOMS, elles entrent dans le détail de chaque action physique. En psychologie écologique, l'interaction d'un organisme avec son milieu sous-tend tout fonctionnement vivant. Assez récemment, des travaux théoriques réfléchissent à une théorisation de l'interaction [HO17] [LEJ17] [Wib17] (section 2.3). C'est le cas par exemple du cadre épistémologique proposé par Magnaudet & Chatty [Cha12] [MC15] qui, après avoir démontré l'inadéquation du paradigme computationnel et du substantialisme pour penser l'interaction, proposent une ontologie de l'interaction fondée sur les processus, permettant de combiner des modes de pensée reflétant la diversité des disciplines de l'IHM (psychologie, informatique, ingénierie, sciences sociales, physique, électronique, ...). Dans cette ontologie, toutes les entités sont des processus

en interaction, et l'interaction elle-même est un processus. C'est ce qui permet par exemple de traiter un geste soit comme un événement ponctuel soit comme une séquence complexe. L'application de cette ontologie à un cadre de développement de systèmes interactifs est possible grâce à un framework, djnn, et à un langage dédié pour décrire les interactions, smala [MCC⁺18].

TABLE 2.1 – A summary of ways theory has been used and developed in HCI [Rog12]

<i>Kind</i>	<i>Description</i>	<i>Exemples</i>
Descriptive	Clarifying terminology and guiding inquiry	théorie de l'activité, cognition distribuée, interaction incarnée
Explanatory	Explicating relationships and processes	cycle de l'action
Predictive	Testing hypotheses about user performance	Fitt's law, GOMS, Keystroke
Prescriptive	Providing guidance on how best to design and evaluate	évaluation heuristique, CRAP, critères Bastien & Scapin
Informative	Importing relevant findings to ground understanding in HCI	boundary objects, synthèse corporelle, perception écologique
Ethnographic	Providing detailed descriptions arising from a field study	ATC paper strips
Conceptual	Eliciting frameworks for informing design and evaluation	CDF, HCI patterns, modèle conceptuel Norman
Critical	Couching HCI in a cultural and aesthetic context	Value Sensitive Design, Critical Interaction
Wild	Developing new theories of technology use <i>in situ</i>	post-phenomenologie

Théories incluant l'ordinateur. Une troisième façon de distinguer les théories est de savoir si elles concernent *les machines*, les systèmes informatiques. A noter, ces théories ne sont pas du tout citées dans l'ouvrage de Rogers [Rog12], comme si les connaissances venant de l'ingénierie n'avaient aucun lien avec la conception, ni surtout aucun lien avec une compréhension du monde. L'article de Hornbaek décrit ci-après le note bien : aucun des concepts d'interaction qu'ils ont recensé dans la littérature (figure 2.3) n'offre de description exploitable de ce qu'est un ordinateur en IHM [HO17]. Witse

et al [WSR15] qui fait la même remarque propose d'utiliser le concept de "wicked interactions" pour déconstruire le concept d'ordinateur dans la perspective du design et de l'IHM (et de la philosophie de la technologie). Sans qu'il s'agisse de théories de l'ordinateur pour des systèmes interactifs, on peut citer les théories d'architecture logicielle comme PAC [Cou87], MDPC [CBNP08], ou Dragicevic et al. [DF04] à titre d'exemple (cf [CBGPT19] pour un état de l'art récent). On verra à cet égard que la philosophie de Simondon permet de penser les humains et les machines à partir de schèmes communs. Mais dans le design interactif on a juste commencé à chercher ce qu'est fondamentalement un objet technique comme par exemple dans le projet "Philosophie du Web" [MD14][HM14] (même si on sait le décrire et le modéliser) : l'objet technique n'est pas un objet de connaissance au même titre qu'un objet du monde, il est plutôt un objet d'évaluation. On ne s'intéresse pas à ce qu'il "est", mais à son utilité ou son efficacité [MF97]. Cet aspect est souligné par de nombreuses approches en philosophie de la technique comme on le verra plus loin (section 2.6).

Axiologies. Une autre façon de distinguer les théories est la présence plus ou moins importante d'une *axiologie*. Les approches Critical HCI (e.g Bardzell [BB13]), interaction incarnée (e.g Dourish [Dou01]) ou post-phénoménologique (e.g Hummels [vDDC⁺13]) sont à la recherche de sens, avec une réflexion sur les valeurs culturelles, morales ou politiques. A cet égard, si on se place sur le plan de l'histoire et d'un éventuel progrès humain, on peut différencier les théories selon leur considération ou non de la place de l'IHM par rapport à l'*évolution humaine* : les théories en question sont assez rares, mais c'est le cas de la post-phénoménologie qui reprend en partie le thème heidéggerien de la transparence ou non de l'outil comme prolongement prosthétique du corps [Hei58], et c'est aussi le cas du modèle de système augmenté d'Engelbart [EG88] [EG88] [Bar06] (section 2.4.2). Les approches de l'action située et de la théorie de l'activité se situent axiologiquement plutôt sur le plan de l'alignement des systèmes techniques aux pratiques. La plupart des autres théories, notamment lorsqu'elles modélisent le fonctionnement humain, s'intéressent plutôt à l'utilisabilité, c'est-à-dire à la performance et à la satisfaction subjective : c'est le cas de la cognition distribuée ou des interfaces tangibles (qu'on distingue ici de l'interaction incarnée).

Théories des processus de conception. La dernière différenciation qu'il m'importe particulièrement de citer est celle qui concerne la *compréhension du processus de conception* en lui-même en tant qu'il concerne les systèmes interactifs. Les théories dont il s'agit ne sont pas des méthodologies, ni des ouvrages ou articles de designers décrivant des processus de conception réels (e.g. [Bux07a] ou [LS04]), mais des théories de la conception qui en expliquent le fonctionnement. A ce titre on peut bien sûr citer les nombreux ouvrages sur la créativité comme celui de Csikszentmihalyi [Csi96] ou l'ouvrage de D. Schön décrivant très précisément le fonctionnement réflexif du designer [Sch84] pour ne citer que ceux-là. Ces théories ne figurent pas dans l'ouvrage de Rogers : dans cet ouvrage, on s'intéresse en effet à la manière dont une théorie informe la conception, mais pas aux théories de la conception. Autrement dit, on ne fait aucun lien entre le fonctionnement humain dans l'interaction et le fonctionnement humain dans la conception. Rogers le souligne elle-même :

So how can theory best inform design? Are there other ways of translating theory-based knowledge, besides turning it into guidelines or analytic frameworks that end up having limited utility? It would seem that quite a different frame of reference is needed—one that focuses more on the process of design and how different kinds of designers want to be supported.

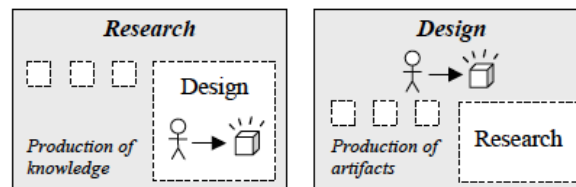


Figure 2. Design-oriented Research (left) vs. Research-oriented Design (right)

FIGURE 2.1 – Différence entre recherche orientée design et design orienté recherche [Fal03]

Théorie autonome. Il manque sans doute à cette liste de critères de distinction entre les théories utilisées en IHM serait un critère qui distingue les théories produites par l'IHM qui seraient *applicables en dehors de l'IHM*.

Il s'agirait de théories propres à l'IHM qui n'informerait ni seulement la conception, ni seulement la compréhension des systèmes interactifs, mais aussi les connaissances scientifiques. Dans la figure 2.1, on ne voit de production de connaissances que d'un côté, celui de la recherche orientée design, comme si la production d'artefacts ne pouvait pas produire de connaissances alors qu'on parle bien de "design orienté recherche" :

Unlike design-oriented research, research-oriented design naturally has "problem solving" within a given paradigm as its main component, as problem setting may become practically infeasible in the commercial world for which the product is primarily tailored. It may relate to research, but have the production of new artifacts as its main motivation, not the production of new knowledge.

Avec les "strong concepts", Höök et Löwgren [HL12] caractérisent explicitement des connaissances issues du design comme étant de *niveau intermédiaire*, entre théories et instances : ils transcendent les situations d'utilisation particulières et même les domaines d'application mais concernent toutefois un élément de conception ou une partie d'un artefact. Ils sont génératifs pour la conception, comme les modèles, les patterns, les portfolios annotés, les méthodes et les outils, mais ne prétendent pas à la généralité théorique. Contrairement aux "conceptual constructs" de Stolterman et Wiberg [SW10], qui ont une origine et une visée théoriques, ils sont issus de la pratique. Les "bridging concepts" [DD14] constituent également une forme de connaissance intermédiaire, comportant un fondement théorique, un ensemble d'articulation de design et une série d'exemples qui démontrent la portée et le potentiel de leur application. Leur rôle explicite est donc de faire le lien entre théorie et pratique.

Ne pourrait-on donc pas envisager des théories qui prétendraient fournir des connaissances scientifiques utilisables et applicables par d'autres disciplines, au lieu de simplement voir l'IHM ou le design comme des applications ou une expérimentation de théories abstraites (e.g. [HOWV18], voir section 2.4.1)? Mon hypothèse est justement que ce manque n'est pas un manque pour l'IHM, mais pour les connaissances scientifiques et épistémologiques elles-mêmes, ne serait-ce qu'en STS (Science and Technology Studies) ou en philosophie de la technique.

L'IHM comme approche complexe. En revanche, est-ce vraiment une impasse pour un développement théorique propre de l'IHM que ce domaine fasse usage des théories dans une combinaison éclectique et pragmatique [Rog04]? Schön faisait déjà état, dans les années 1980, d'une situation des pratiques professionnelles (dont l'ingénierie et le design) où les approches techniques, par résolution de problèmes en appliquant des théories, n'étaient plus suffisantes pour faire face à la complexité des situations [Sch84]. Face à la complexité, faite de problèmes ouverts, évolutifs, instables, indéterministes, non généralisables, conflictuels et incertains, la capacité des disciplines de l'IHM et du design n'est-elle pas précisément une capacité qui s'ignore à ce qu'on appelle aujourd'hui les approches systémiques [Mor90][Moi77][dR75] (en anglais : systems thinking) [Jac19])[Sch84]²? Selon Schön [Sch84], il faut en effet dépasser l'option d'un choix unique parmi les théories en lice dans une approche de résolution de problèmes et une utilisation instrumentale des théories.

What is called for, under these conditions, is not only the analytic techniques which have been traditional in operations research, but the active, synthetic skill of "designing a desirable future and inventing ways of bringing it about".

L'alternative ne serait-elle que de limiter l'IHM à une réponse adaptative suffisamment rapide aux besoins instrumentaux [Kei08] générés par la technologie elle-même? Enfin, la force théorique de ces disciplines n'est-elle pas, dès lors, dans la lignée du pragmatisme d'un Dewey [Hic90], dans la nécessité de parvenir à "rendre compte" (give an account) de ces capacités, avec l'émergence d'un pluralisme professionnel, à reformuler les problèmes, à accepter l'indétermination, à inventer d'autres voies par une approche "who must choose among multiple approaches to practice or devise his own way of combining them".

Pratique. Pour conclure ce repérage rapide, je pense utile de préciser qu'il est aussi un marqueur immédiat qui distingue les théories selon qu'elles sont profondément *intégrées dans la pratique d'un chercheur*, à travers sa formation notamment, mais aussi ses projets. C'est le cas pour ma part tout d'abord de la théorie de l'action située [Suc87], qui constituait l'un des piliers théoriques du LRI et de l'équipe *In Situ* où j'ai fait ma thèse et effectué un post-doc. Ce sont ensuite la cognition distribuée et l'interaction incarnée et

2. Cet aspect sera abordé au chapitre 7

tangible qui ont été utilisées comme cadre de référence théorique pour l'essentiel des projets auxquels j'ai participé ensuite à l'ENAC, qu'il s'agisse du travail sur les strips des contrôleurs aériens (section 4.2.2) ou des explorations sur la physicalisation des interfaces des pilotes de ligne (section 4.3). Toutes ces approches sont caractérisées par une méthodologie commune [Rog04], dont les études de terrain (contextual design [BH98]), et l'analyse qualitative [CS90], dite "ethnographique". Ce qui est commun à ces théories, et qui est mis en pratique dans la méthodologie, c'est l'intérêt pour les détails, le contexte, la pratique. Ce qui est difficile mais qu'on maîtrise mieux après quelques années de pratique, c'est de se donner le droit de comprendre et de généraliser, comme le souligne Rogers [Rog04]. Dans un ouvrage passionnant intitulé "De l'angoisse à la méthode" [Dev67], Devereux, fondateur de l'ethnopsychiatrie, propose une théorie de ce processus de compréhension dont j'ai acquis la connaissance il y a seulement quelques années³. Cette théorie repose sur le principe de contre-transfert familial aux psychanalystes, symétrique du transfert du patient : être consciente de ce principe, qui désigne les réactions émotionnelles engendrées par la confrontation avec le terrain mais aussi les processus d'empathie et d'intuition qui sont inévitablement à l'œuvre, et surtout *accepter* ce principe et utiliser les compréhensions qui en sont issues à titre d'hypothèses de travail [BZD21], m'a permis d'enrichir considérablement mon travail.

2.3 Définir l'interaction ?

Il paraît nécessaire de pouvoir définir un concept qui, même s'il n'est qu'un des trois termes figurant dans un sigle (IHM ou HCI), est celui des trois qui prétend, tel un trait d'union, faire de "quelque chose *entre* deux types de choses" un domaine entier de recherche, une discipline professionnelle, un périmètre technologique, un ensemble de savoirs et de compétences. Selon Hornbæk et al [HO17], constatant qu'il est rare de trouver de réels efforts de définition dans la littérature en IHM, une définition devrait pourtant améliorer les connaissances sur l'interaction : comment la mesurer, la prédire, etc. Ensuite comprendre ce qu'est l'interaction permettrait de mieux savoir ce qui fait une *bonne* interaction : c'est comme s'il s'agissait d'un outil pour réfléchir, dont nous ne connaîtrions cependant ni les usages, ni les hy-

3. grâce à une collègue de l'ENAC, Anne-Marie Schaal, que je ne saurais trop remercier pour cela

pothèses, ni les limitations. Enfin bien sûr, le concept d'interaction est ce qui rattache les disciplines disparates et les valeurs de l'IHM. De fait, des travaux récents ou moins récents, à la recherche d'une théorie unifiant le domaine de l'interaction homme-machine [LEJ17] [Wib17] [MC15] [Pay90] ainsi que les travaux sur le design [BL04], utilisent le concept d'interaction pour réfléchir à ce qui unifie ce champs.

Descriptions du phénomène. Une première approche consiste à décrire le phénomène d'interaction humain-machine par ce qui s'y passe techniquement et logiquement parlant.

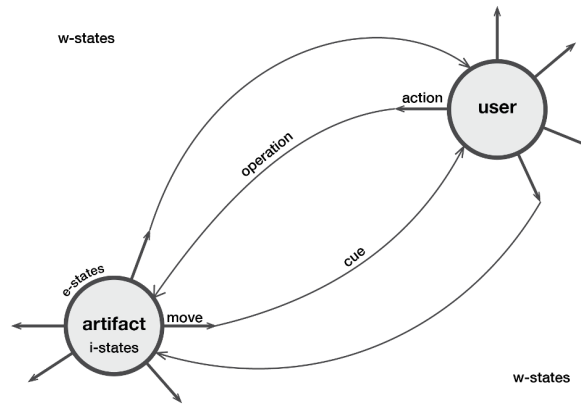


FIGURE 2.2 – A user registers/interprets cues from the artifact and performs actions. An artifact registers operations and performs moves. An artifact has internal states (i-states) and external states (e-states). The state of the environment/context (w-states). [LEJ17]

Un exemple récent de ce type de description générale et abstraite est donné par Stolterman et Janlert dans [LEJ17]. La figure 2.2 illustre cette définition en décrivant l'interaction comme un ensemble de signaux de données et de contrôle entre des éléments.

Définitions par analogie. Une autre approche, considérant que l'interaction est un phénomène complexe qui prend son sens dans un contexte plus large, consiste à caractériser l'interaction comme une manière de faire

ou de penser. Il peut s'agir de styles ou d'objectifs de comportement, ou de façons de comprendre l'interaction. Comme exemple de la première catégorie, "Designing Interaction, Not Interfaces" de Beaudouin-Lafon [BL04] définit trois paradigmes d'interaction : computer-as-tool, computer-as-partner, and computer-as-medium, désignant respectivement l'interaction qui étend les capacités humaines par l'outil, la communication avec un "agent" anthropomorphiques dans l'ordinateur, par exemple par langage naturel, et l'interaction comme un moyen de communication entre humains (courrier électronique, chat, vidéoconférence...).

Dans la seconde catégorie, je citerai deux exemples. Le premier vient du livre de Stolterman et Janlert déjà cité [LEJ17]. Ils décrivent des "thought styles" qui désignent la façon dont nous comprenons ce qu'est une interface et, par conséquent, la façon dont nous "lisons" et donnons un sens aux systèmes interactifs. Quatre styles sont identifiés : l'interface comme surface-of-contact, boundary, control ou expressive-impressive. Le premier style est technique, emprunté à la tradition des machines industrielles ; le second souligne la fonction de protection, de simplification (c'est ce qu'on trouve par exemple dans la notion de protection contre la variation en conception objet) ; le troisième fait référence au panneau de contrôle, l'interface devant manifester ce qui peut être fait (modèle de Norman) ; enfin dans le quatrième style on s'attache à une métaphore conversationnelle, incluant l'impression et l'émotion.

Le second exemple est proposé dans l'article de Hornbæk et Oulasvirta ("What is interaction?") [HO17]. L'article choisit de se concentrer non pas sur la définition "juste" de l'interaction, mais sur les éléments théoriques existants en IHM, et sur 1) comment ils considèrent l'interaction en termes de relations entre humains et ordinateurs ainsi que 2) comment cette compréhension peut informer la conception. Les résultats de cette analyse se résument dans le tableau de la figure 2.3 où figurent des vues très différentes de l'interaction (comme dialogue, transmission, utilisation d'outils, comportement optimal, incarnation, expérience, contrôle) (la définition de Janlert et Stolterman correspondrait à celle de dialogue [LEJ17]). Cette recherche de "vues" fait écho aux "thought styles" de Stolterman et Janlert dans [LEJ17] ("interface as" est cependant devenu "interaction as") et étend les paradigmes d'interaction de Beaudouin-Lafon [BL04] ("computer as" est devenu "interaction as"). A chacune de ces vues sont associées des phénomènes et concepts d'intérêt, ce qu'ils impliquent pour déclarer ce qu'est une bonne interaction, et dans la dernière colonne, quelles méthodes y sont

Concept	View of interaction	Key phenomena and constructs	Good interaction	Example support for evaluation and design
Dialogue	a cyclic process of communication acts and their interpretations	mappings between UI and intentions; feedback from the UI; turn taking	understandable; simple, natural; direct	methods/concepts for guessability, feedback, mapping; walkthroughs
Transmission	a sender sending a message over a noisy channel	messages (bits); sender and receiver; noisy channels	maximum throughput of information	metrics and models of user performance
Tool use	a human that uses tools to manipulate and act in the world	mediation by tools; directness of acting in the world; activity as a unit of analysis	useful and transparent tools; amplification of human capabilities	compatibility in instrumental interaction; break down analysis
Optimal behavior	adapting behavior to goals, task, UI, and capabilities	rationality; constraints; preferences; utility; strategies	improves or reaches maximum or satisfactory utility	models of choice, foraging, and adaptation
Embodiment	acting and being in situations of a material and social world	intentionality; context; coupling	provides resources for and supports fluent participation in the world	studies in the wild; thick description
Experience	an ongoing stream of expectations, feelings, memories	non-utilitarian quality; expectations; emotion	satisfies psychological needs; motivating	metrics of user experience; experience design methods
Control	interactive minimization of error against some reference	feedforward; feedback; reference; system; dynamics	rapid and stable convergence to target state	executable simulations of interactive control tasks

FIGURE 2.3 – Extrait de [HO17]. Aperçu de certains concepts clés de l'interaction dans la littérature sur les IHM. Les colonnes résument le point de vue central de ce qu'est l'interaction, les phénomènes clés que ce point de vue a permis de voir et les constructions qui leur sont associées, la notion de bonne interaction qui découle de ce point de vue, et les techniques et méthodes clés pour aider à évaluer et concevoir des interfaces utilisateur.

associées. Les auteurs remarquent tout d'abord trois points aveugles dans cette analyse : ces vues de l'interaction ne disent rien sur la manière dont l'interaction transforme quelque chose auprès des utilisateurs (par exemple leurs intentions) ; elles ne disent rien non plus sur ce qu'est un ordinateur ; enfin elles ne disent rien sur ce dont est faite l'interaction (le lien, l'interplay, les actions), mis à part par exemple les étapes du cycle de l'action de Norman [Nor86].

Définitions et méthodes. C'est ensuite le problème du lien entre une vue de l'interaction et les méthodes associées qui se pose. Selon [HO17] :

The observant reader will have noted that we did not discuss in depth, so far, the column about evaluation and design in Table 1 [Fig. 2.3] (Example Support for evaluation and design). This is rooted in an unease with the extent to which views of interaction support thinking about construction, an essential part of problem-solving in HCI [OH16]. For the present paper, this has to do with how concepts of interaction can inform design.

La question est de savoir si une recherche théorique sur ce qu'est l'interaction peut apporter des éléments pour la conception. Concernant cette question, les auteurs proposent trois catégories de théories sur l'interaction selon qu'elles sont design-agnostic, design-sensitizing ou design-determining, ce qui est déterminé par leur capacité à répondre à un raisonnement hypothétique (counterfactual reasoning) stipulant : si telle condition (d'interaction) se produit, quelles sont les conséquences ? Dans la première catégorie, design-agnostic, se trouvent les théories qui ne peuvent informer la conception que a posteriori et elles servent surtout à comprendre des phénomènes. Les théories design-sensitizing permettent de donner des directions, mais ne disent pas comment y arriver ; ce sont, comme les visions "interaction-as-embodiment" ou "interaction-as-tool-use", des "super frameworks" qui relient un ensemble de facteurs et de phénomènes. Enfin les théories "design-determining" qui sont capables de faire le lien entre un choix de conception et un phénomène d'interaction, mais il se trouve que ce sont le plus souvent des théories externes à l'interaction (sciences comportementales et sociales). La conclusion est qu'il est difficile d'avoir des théories de l'interaction qui ont à la fois un haut degré de détermination et une portée adéquate. En d'autres termes, il est difficile d'obtenir des concepts d'interaction (et des théories ou des concepts généraux d'IHM, d'ailleurs) qui traitent d'un grand nombre de phénomènes au niveau de spécificité nécessaire pour éclairer les décisions de conception.

Vers un élargissement. La conclusion de l'article de Hornbæk et Oulasvirta [HO17] s'oriente vers une autre proposition de définition, ou du moins vers une autre dimension, selon laquelle l'interaction n'est pas simplement le fait qu'un ordinateur et un humain sont engagés dans des actions réciproques, mais plutôt le fait qu'il s'agit de deux entités qui déterminent leur comportements réciproques. On peut noter que cette vue de l'interaction n'est pas présente dans le tableau de la figure 2.3. L'article propose en effet des dimensions décrivant la *relation* entre humain et ordinateur, notamment la manière dont cette relation est déterminée causalement. Selon les auteurs, il s'agit avec cette notion de relation d'*expliquer* l'interaction. Selon la théorie de Bunge qui est invoquée ici [Bun79], l'interaction humain-machine a trait aux déterminations conjointes qu'à la fois l'humain et l'ordinateur ont dans le cours des événements. Les déterminations possibles sont la détermination téléologique, mécanique, statistique, structurale et dialectique, en plus de la

détermination causale de base et l'auto-détermination. Toutes les théories utilisent en fait la détermination téléologique, puisqu'un utilisateur est considéré avoir un but, même si comme dans la théorie de l'action située il n'y a pas de plan général. Un exemple de détermination statistique est la loi de Fitt's, et pour la détermination mécanique il y a GOMS ou Keystroke. La détermination structurelle consiste à expliquer les parties par le tout, comme dans l'analyse de tâches mais aussi dans l'interaction incarnée.

Ce qu'on peut observer c'est que, d'une part, on est passé du concept d'interaction à celui de relation, et que dans la réflexion sur la relation on cherche à comprendre comment des entités se déterminent⁴. Ce passage ne résout pas le problème de la fondation des méthodes de conception dans une théorie de l'interaction, mais le principe d'une co-détermination introduit un idée supplémentaire. Si nous résumons nous avons les questions suivantes :

1. comment une théorie de l'interaction peut fonder une méthode de conception de l'interaction, avec trois niveaux identifiés (théories design-agnostic, design-sensitizing, design-determining) ?
2. que pourrait apporter une théorie de l'interaction qui rende compte d'une relation co-déterminante entre humain et ordinateur ? (section 2.4.2)

Une question qui n'est pas posée dans l'article est de savoir si une théorie de l'interaction comme co-détermination d'une relation ne serait pas particulièrement bien placée pour informer la conception. Nous verrons plus loin (section 2.7) qu'on peut aller plus loin dans une ontologie relationnelle, qui prend la relation comme un concept unificateur et de ce fait permet de penser l'interaction et la conception dans un continuum, comme deux niveaux de stabilité dans une réalité individuante.

Enfin, comme le remarque l'article, en IHM, on a beaucoup d'éléments sur l'humain, mais on dit assez peu de choses sur l'ordinateur. Peut-on dès lors faire l'hypothèse que s'il y a déterminations réciproques, on aura une nouvelle piste pour comprendre ce qu'est un ordinateur (ou un objet technique en général) en vertu de cette relation ? La proposition de Simondon est d'inclure dans la culture la compréhension de l'objet technique lui-même, ses schèmes universels de fonctionnement, sa concrétisation, sa genèse (section 2.7.4).

4. On verra plus loin qu'il sera intéressant de discuter ce passage par rapport au changement de perspective de la philosophie de la technique proposé par la post-phénoménologie, perspective également recentrée sur la relation ou la médiation humain-technologie.

2.4 Au-delà de l'interaction ?

Prenant la suite d'un rapide état de l'art sur la question de la définition de l'interaction, cette section recense quelques-unes des approches qui recherchent un "au-delà" de l'interaction, visant souvent par là une description riche du phénomène d'interaction, un cadre ou une description élargis. Ce repérage a pour fonction, en quelque sorte, d'identifier ce qui pousse le concept d'interaction "depuis l'intérieur" de l'IHM. Pour Taylor par exemple, [Tay15], le concept d'interaction repose sur une notion dépassée de l'usage de la technologie. Selon lui, l'utilisation de la technologie concerne bien plus que les interactions humain-machine (du moins dans la manière dont l'interaction est régulièrement imaginée en IHM et en IxD). La conception technologique participe en effet selon lui à la *configuration* de relations denses entre humains et non-humains. Pour lui, nous donnons forme à des réseaux qui mobilisent et enchevêtrent personnes et machines, et produisent ce que nous pourrions considérer comme des mondes - des mondes sociaux, techniques, scientifiques, intellectuels, organisationnels, politiques, éthiques.

Pour préciser ce qui m'a semblé important par rapport à cette critique, j'ai choisi d'aborder successivement la théorie de la médiation qui situe l'interaction humain-technique dans le cadre plus large des relations humain-monde (section 2.4.1), puis la philosophie d'Engelbart qui situe l'interaction dans le cadre encore plus général d'une évolution anthropologique du système humain-technique, évolution qu'il estime déséquilibrée et dans laquelle l'IHM peut jouer un rôle (section 2.4.2), puis enfin un état de l'art sur la matérialité de l'interaction (section 2.5). Ce cheminement m'amènera ensuite, après un bref point sur les convergences et divergences entre théories de l'IHM et philosophies de la technique, à exposer le point de vue de Simondon sur la technique comme un des champs - mais non le seul - de l'individuation, l'individuation étant une proposition de concept pour comprendre l'interaction.

2.4.1 La technique comme médiation

L'approche de la technique comme médiation élargit la réflexion sur l'interaction humain-technique en la situant dans le cadre plus général de la relation humain-monde dans la théorie de la médiation. Les deux grandes théories de la médiation utilisées en IHM sont la théorie de l'activité [Bø89][KN12] et la post-phénoménologie. La théorie de l'activité propose un modèle hiérarchique d'activités qui s'effectuent à différents niveaux de

conscience, en termes d'opérations, d'actions et d'activités en médiation avec des artefacts [BK11], ainsi qu'un certain nombre de principes qui permettent d'adapter la conception au contexte de l'activité, par exemple en termes de contradictions, de règles et de division des tâches [Eng90]. Notamment, l'analyse des tensions donne un aperçu riche de la dynamique potentielle d'un système et de ses possibilités d'évolution [CSR02].

C'est plutôt l'approche de la post-phénoménologie qui est décrite dans cette section, d'une part parce qu'elle propose une description détaillée de la matérialité des médiations et de la notion d'embodiment, et d'autre part parce qu'il s'agit d'une des théories philosophiques effectivement appliquée aujourd'hui en IHM. Notamment, pour ne citer que ceux-là, les travaux de Caroline Hummels (e.g [vDDC⁺13], [JA18]) ou de Ron Wakkary [HOWV18] sont un exemple de ce que serait de faire de la philosophie "à travers les choses" (donc à travers les systèmes interactifs) et même au-delà, un exemple de ce que cela serait d'ouvrir une voie méthodologique et expérimentale pour la philosophie.

Approche post-phénoménologique

La théorie de la médiation de Verbeek [Ver05], inspirée de Don Ihde [Ihd90], se positionne dans une vision des relations humain-technique qui n'est ni instrumentale (la technique comme outil neutre) ni dialectique (la technique comme oppression ou aliénation), mais plutôt hybride. L'approche hybride voit en effet un problème fondamental dans les approches instrumentale et dialectique. Approcher les technologies en termes d'extension ou d'opposition à l'être humain situe implicitement les humains et les technologies dans deux sphères distinctes : l'une du sujet humain, l'autre de l'objet technologique. Or, cette séparation ne permet pas de saisir l'imbrication complexe des humains et des technologies, dont l'IHM n'est qu'un cas parmi d'autres. Verbeek reproche d'ailleurs au concept d'interaction d'occulter les termes de la relation qui se crée dans l'interaction. Non que l'humain et la machine soient des entités données à l'avance, ces entités se façonnent plutôt mutuellement à travers les relations qui s'établissent entre elles. Il s'ensuit que, comme on le verra chez pour Leroi-Gourhan et Engelbart (section 2.4.2), concevoir la technologie, c'est concevoir l'humain. Enfin, c'est plus la relation humain-monde qui est l'objet de cette approche, en tant qu'elle est médiée par la technologie. Pour analyser la manière dont les technologies jouent un rôle dans les relations entre l'homme et le monde, Verbeek s'appuie sur quatre

types de relations identifiées par Don Ihde [Ihd90] : embodiment, hermeneutic, alterity et background relations (table 2.2).

TABLE 2.2 – Types de médiations selon la post-phénoménologie

incarnée	$(\text{humain} - \text{technologie}) \rightarrow \text{monde}$
herméneutique	$\text{humain} \rightarrow (\text{technologie} - \text{monde})$
altérité	$\text{humain} \rightarrow \text{technologie} - (-\text{monde})$
arrière-plan	$\text{humain}(\text{technologie}/\text{monde})$
cyborg	$\text{humain}/\text{technologie} \rightarrow \text{monde}$
intelligence ambiante	$\text{humain} \leftrightarrow \text{technologie}/\text{monde}$
augmentation	$(\text{humain} - \text{technologie}) \rightarrow \text{monde} +$ $\text{humain} \rightarrow (\text{technologie} - \text{monde})$

Dans les relations d'*incarnation*, les technologies forment une unité avec l'humain, elles s'intègrent au schéma corporel, et en ce sens, elles sont "transparentes", même si la relation au monde est transformée. C'est cette unité qui est dirigée vers le monde : nous parlons avec d'autres personnes par le biais du téléphone, plutôt que de parler au téléphone lui-même, et nous regardons à travers un microscope plutôt que de le regarder. C'est également ce type de relation qui caractérise le conducteur d'une voiture de sport ou le pilote dans les contextes plus "physiques" d'un vol (voir section 4.3). Cette relation renvoie au principe de synthèse corporelle décrit par Merleau-Ponty [MP45] inspiré lui-même du concept de *Zuhand* de Heidegger [Hei27]. Mais l'incarnation est partielle, d'où l'identification d'une certaine opacité résiduelle par Ihde, une *enigma position*, indiquée par le trait : –.

Les relations *herméneutiques* sont des relations dans lesquelles les humains "lisent" ou "interprètent" des *représentations* technologiques du monde : comme un scanner IRM représente l'activité cérébrale, le bip d'un détecteur de métaux représente la présence de métal. La relation est orientée de l'humain vers les modes de représentation du monde. Ici, les technologies forment une unité avec le monde qu'avec l'humain qui les utilise, ce qui est dénoté par les parenthèses qui sont déplacées vers la droite. Nous verrons même (section 4.3) qu'un pilote fait souvent plus confiance à une représentation instrumentée du réel (en tête basse) qu'à sa propre perception du monde (en tête haute à travers la vitre) : cela montre à quel point cette notion d'unité technologie-monde peut avoir du sens, même si cette unité

dépend de la fiabilité de la technologie (ce qui explique la présence d'une position "énigme" avec un – cette fois de ce côté-là, une opacité, puisqu'il se peut que rien n'indique un dysfonctionnement [CCGBV14]).

Dans la relation d'*altérité*, les humains interagissent avec une technologie comme avec un individu, mais *un individu autre*, le monde étant à l'arrière-plan de cette interaction. Ce sont par exemple les interactions humain-robot, le retrait à un guichet automatique ou l'exploitation d'une machine. Selon Verbeek [Ver15], cette relation est centrale en design d'interaction. Ici, la mise entre parenthèses du monde indique que dans ce type de relation, c'est la technologie qui constitue le focus de l'intentionnalité : la technologie peut encore médiatiser une relation au monde, mais ce n'est pas requis, et ce dernier peut rester en arrière-plan (la post-phénoménologie de Don Ihde a en effet adapté de la phénoménologie de Husserl et Heidegger les notions de corrélations intentionnelles dans la "conscience de" et dans notre rapport au monde (being-in-the-world) [Ihd79]).

Dans la relation d'*arrière-plan*, les technologies constituent le contexte, le fond, des activités humaines. C'est le cas par exemple avec les systèmes quasi automatiques de chauffage ou de climatisation, qui ne sont perçus de manière périphérique que dans les phases transitoires, ou avec les notifications de téléphones portables qui se produisent sans qu'on les remarque durant une conversation. Cette relation est notée sans flèche, car elle n'est pas intentionnelle. D'autre part, il n'y a dans ce type de relation ni transparence ni opacité, ce qui est indiqué par le remplacement du – par un /. Plus qu'un retrait de la technologie comme on l'observe dans l'unité que l'on peut observer entre le corps et les lunettes, ou entre les cadrans d'un cockpit et l'état des moteurs, il y a plutôt absence : la technologie est mise de côté. Un exemple de design IHM donnant lieu à une relation d'arrière-plan est cette *Photobox* qui fonctionne quand elle veut en imprimant au hasard quelques photos d'un album Flickr à intervalles aléatoires chaque mois [HOWV18].

D'autres notations sont proposées soit pour indiquer une fusion corps/technologie, qui crée une relation de type *cyborg*, comme pour des implants, ou pour décrire l'intelligence ambiante ou les technologies persuasives, où la technologie détermine un contexte mais interactif qui provoque une *immersion*. Enfin, pour décrire des dispositifs qui sont à la fois incarnés et herméneutique, comme des lunettes Google, on peut définir une relation d'*augmentation*. Un exemple qui se situe entre relation incarnée et fusion est la *Greenscreen Dress* dans [HOWV18], avec un contenu est affiché numériquement sur le tissu vert, rendant le vêtement aussi vivant que le corps

qu'il habille.

Comme le souligne Luan [Lua20], les opérateurs :

$-$, $()$, \rightarrow , \leftrightarrow ou $/$

permettent des descriptions très fines des imbrications humain-technique-monde. Le tiret $-$, indiquant une potentielle opacité, accompagné des parenthèses $()$ qui décrivent une unité malgré cette opacité, complète très utilement la relation intentionnelle humain monde (\rightarrow), et c'est à ce niveau que se situent l'essentiel des problématiques de l'IHM. Ainsi, l'expression (*humain-technique*) qui caractérise la relation d'embodiment positionne les approches interfaces tangibles et incarnées, mais aussi la cognition distribuée dans laquelle on considère l'extériorisation - donc aussi l'extériorisation technique - comme une opération cognitive. L'expression (*technique-monde*) qu'on trouve dans la relation herméneutique renvoie elle au domaine de la visualisation pour la conception de représentations efficaces. Ce que le tiret ouvre, dans les deux expressions, c'est le travail du design d'interaction pour aligner et ajuster d'un côté humain et technique, et de l'autre représentation technique et réalité à représenter. Les expressions se combinent aussi, avec le design écologique qui vise à une transparence tant du côté incarné que du côté représentation, ou avec la visualisation interactive ou même la physicalisation des données [DJM21], ou avec l'interaction humain-robot (*humain \rightarrow technologie(monde)*) peut viser une meilleure utilisabilité, une meilleure incarnation en devenant : (*humain-technologie*) \rightarrow *technologie(monde)*, ou encore avec l'intelligence ambiante (*humain \leftrightarrow technologie/monde*) qui peut s'exprimer comme : (*humain-technologie*) \leftrightarrow *technologie/monde* pour souligner les problématiques IHM associées.

A la question que se posent Hornbæk et Antti Oulasvirta [HO17] sur la façon dont les intentions sont formées ou affectées par l'interaction (au-delà d'un modèle de type cycle de l'action comme celui de Norman), question qu'ils ont identifiée comme un des points aveugles des définitions de l'interaction (même si l'action située y répond déjà), l'approche de la médiation apporte ces variations dans les types de relation où c'est justement l'intentionnalité qui est représentée à différents niveaux, avec transferts potentiels d'un type à l'autre au gré des dysfonctionnements et des changements de focus. Par exemple, c'est la différence entre *humain \rightarrow technologie(monde)* et *humain \rightarrow (technologie-monde)* où l'interaction avec un robot, par exemple un drone dans une situation de safe-and-rescue, exhibe une variation de focus entre les soucis de pilotage du drone et les actions à mener sur le terrain où le drone n'est là que pour transmettre des informations sur la

scène de travail. Comme le précise Verbeek [Ver15] :

Human beings have their own goals and intentions, and products should help them to realize them in an optimal way. In many cases, though, these goals and intentions do not exist independently from the technologies that are used. Social media has generated new types and dimensions of social relations that were not intended in the design of the technology, but rather emerged from them. These technologies do much more than merely function - they help to shape human existence.

Par ailleurs, la notion de *multistabilité* renvoie à l'idée que toute technologie peut être utilisée à de multiples fins et peut avoir une signification différente pour différents utilisateurs [RV15]. La technologie est à la fois quelque chose qui nous influence, nous contrôle et nous contraint, et quelque chose que nous concevons et utilisons à nos propres fins, comme cela est illustré par cette analyse des usages d'un téléphone de village au Bangladesh et du type de relations établies selon qu'il s'agit du propriétaire ou du locataire de téléphone, d'aller chercher quelqu'un au village, de récupérer un téléphone volé etc [ZD13] (fig. 2.4).

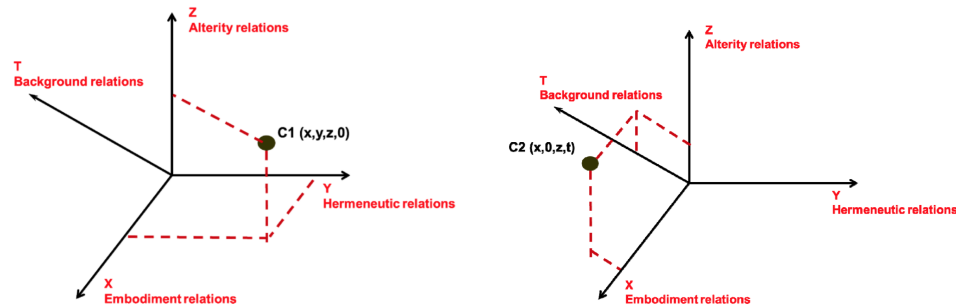


FIGURE 2.4 – Analyse post-phénoménologique des interactions avec des téléphones mobiles dans un système de location temporaire au centre d'un village du Bangladesh [ZD13].

On retrouve le principe de *basculément* entre *Zuhand* et *Vorhand* de Heidegger [Hei27], ou le concept de *breakdown* et de changement de focus en théorie de l'activité avec cette analyse du cahier de laboratoire des biologistes qui peut passer du statut de cahier instrument (transparence du ca-

hier pour mener une activité scientifique, une réflexion, une analyse) à cahier objet (objet d'intérêt, cahier à soigner, maintenir, archiver) [KZ10] [BK11]. C'est aussi la flexibilité d'usage : un pot de yaourt peut servir aussi à faire pousser des plantes, décorer sa chambre ou adosser son téléphone portable pour voir une vidéo, et cet aspect introduit l'idée qu'une des relations qui à mon sens manque dans la typologie est celle de fabrication, comme dans le domaine de l'EUD [HPVW05], qu'on pourrait peut-être schématiser par : $(\text{humain} - \text{monde}) \rightarrow \text{technologie}$ ou $(\text{humain} - (\text{technologie}/\text{monde})) \rightarrow \text{technologie}$ pour signifier que c'est une relation de fabrication. C'est une autre forme de transparence, celle du fonctionnement de l'objet technique, assez opposée à la transparence dans l'usage "à travers" l'outil puisqu'au contraire l'outil devient l'objet d'attention. En cas de panne, un outil "transparent" doit pouvoir être remis en état de marche. Le boîtier bien scellé des objets électroniques interdit toute réparation, alors qu'un objet technique transparent peut être ouvert, compris et réparé, et par là serait également durable [VK97].

La post-phénoménologie considère que l'accent mis sur l'interaction et la notion sous-jacente de fonctionnalité limite l'analyse des relations humains-technologie, notamment la manière dont la technologie façonne l'humain à travers des "transformative mediators" plutôt que des outils ou instruments séparés ou encore des machines aliénantes. Dans certains travaux de recherche [HOWV18], la non utilité est soulignée pour illustrer l'intérêt de la philosophie pour des objets qui ouvrent à d'autres usages (par exemple, la "table-non-table" qui se déplace qu'en on s'en sert! [HOWV18]). La critique de l'utilitarisme de Simondon est différente, et vise plutôt à exprimer l'essence des objets techniques indépendamment de leurs fonctions [Sim58] (section 2.7.4).

Concernant l'apport scientifique potentiel de l'IHM pour d'autres domaines, les travaux de Hauser et al [HOWV18] se positionnent comme pouvant apporter à la post-phénoménologie d'autres méthodes d'exploration, pour parvenir à *faire de la philosophie à travers les choses*. Contrairement aux études post-phénoménologiques classiques, les artefacts étudiés sont conçus spécifiquement pour l'analyse : ce n'est pas simplement un nouvel artefact qui est étudié mais, avec lui, un nouveau "monde" (objectivité) et un nouvel "humain" (subjectivité) médiatisés qui sont explorés. Ce qui est proposé, avec la capacité à fabriquer l'objet, est donc, pour la philosophie post-phénoménologique, une méthode d'investigation générative, sur mesure et plus expérimentale.

Enfin, mais c'est une question que nous reverrons plus loin (section 2.7), la nature relationnelle de l'interaction propose une vision particulière de la matérialité, et pose également la question de la nature des termes de la relation. Si la post-phénoménologie relationnelle avec Don Ihde et Verbeek revendique son matérialisme (e.g. [Ihd90]) :

I wish to retain the sense of materiality which technologies imply. This materiality correlates with our bodily materiality, the experience we have as being our bodies in an environment.

elle affirme aussi l'existence d'entités bien réelles mises en relation [Ver15], même si ces entités sont façonnées à travers la relation. Comment la matérialité est-elle pensée dans ce cadre ? Nécessite-t-elle comme l'affirme Verbeek la mise en avant des choses, corps et artefacts (d'où le titre "What things do?" [Ver05]), ou au contraire, comme dans la proposition théorique d'un concept d'interaction basé sur des processus de Magnaudet et al [MC15] le concept de substance est-il inadéquat pour penser et concevoir l'interaction, ne serait-ce que parce que notre expérience du monde ne se réduit pas à la perception des objets et de leurs attributs ? Nous verrons (section 2.7.1) comment le concept d'individuation permet de penser l'individu comme processus et non comme substance.

Interface ou interaction ?

Il y a plusieurs sens du mot "interface". Il se trouve qu'en IHM, ce mot désigne l'ensemble logiciel et matériel concret existant entre l'utilisateur et le système informatique. Dans son article "Designing Interaction, Not Interfaces" [BL04] Beaudouin-Lafon défend le principe selon lequel ce qui est l'objet de la conception n'est pas cet ensemble logiciel et matériel, mais une dynamique plus riche, sur la base de modèles d'interaction, d'une meilleure compréhension des détails sensori-moteurs de l'interaction et d'une vision plus large de l'interaction dans son contexte de l'utilisation. En mettant en avant l'interaction par rapport à un objet logiciel et matériel, ce principe vise en fait à proposer un concept, celui d'interaction instrumentale, qui propose des principes pour conceptualiser et mettre en œuvre une médiation entre utilisateurs et document. Par rapport aux modèles relationnels vus précédemment, il s'agit d'une médiation à mi-chemin entre médiation incarnée et médiation herméneutique, puisque dans l'interaction instrumentale l'objet technique est pour partie instrument et pour partie monde, le document étant l'objet technique représentant une réalité.

D'autres approches, en revanche, utilisent bien le mot "interface", dans un sens plus général qu'en IHM, pour parler d'autre chose que d'un ensemble logiciel et matériel.

Giroud [Gir21] propose de penser l'interface selon une approche relationnelle, comme une modalité d'une relation entre représentation et numérique. Il y démontre que comme dans toute médiation, il n'y a pas d'interface en dehors de ses effets. Dans la relation entre représentation et numérique, l'interface, comme médiateur, "fait" (facere) et par cette opération, transforme, modifie, interrompt, détourne, fait émerger des choses différentes. Elle relie tout en séparant [Hoo14], "translate" (traduit et transporte), et "transduit" au sens simondonien [Sim05] dans la mesure où elle individue en faisant face (faire face et faire une face).

Dans l'ouvrage "Interface" de Hookway [Hoo14], l'interface est définie comme "a dynamic boundary condition", empruntant à son acception dans le concept de formation dynamique d'interface en dynamique des fluides [Tho12]. Dans le concept d'inter-face, "inter" est analysé comme une relation interne à un champs délimité, avec une orientation visant l'intériorité des éléments reliés, tandis que "face" est au contraire plutôt compris comme apparence, visage, visant l'extérieur, dans la constitution active d'une présence (facere). L'interface y est comprise non comme une technologie, mais comme une trajectoire :

for example when an internal boundary condition that produces the dynamic form or trajectory defining a system becomes either a means of accessing that system from outside it, or a site of influence over a thing outside or over the environment within which it operates

avec une différence entre l'interface comme objet de design et l'interface en fonctionnement :

Likewise, when an interface is an object of design, a space of play exists between the interface as a design problem - including where it is broken down into series of subproblems (or perhaps a series of surfaces) - and the interface as it operates or is experienced.

Si cette distinction entre interface et interaction paraît relever de la discussion soulevée précédemment entre la conceptualisation substantielle et relationnelle (l'interface étant habituellement pensée comme objet), il semble néanmoins que c'est bien la nature relationnelle, dynamique et médiatrice qui soit décrite dans ces deux approches.

2.4.2 Interaction et co-évolution

Comme le rappelle Belinda Barnet [Bar06], l'un des ancêtres fondateurs de l'IHM, Doug Engelbart, a en fait proposé dès le départ de penser la relation humain-technologie en termes de co-détermination, et ce, en situant cette relation dans un processus global de co-évolution en humains et technique [EG88]. Il existe une longue tradition au sein de la philosophie qui étudie la relation entre les êtres humains et la technologie.

Pour certains [Ram99], cette relation est instrumentale et extérieure : les facteurs régissant l'évolution de la technologie dans le temps sont extérieurs à la technologie elle-même, et les artefacts techniques s'ils sont créés par l'humain, ne les "créent" pas en retour. D'une certaine manière, l'être humain est défini et affirmé contre la technique.

Pour d'autres, comme notamment Leroi-Gourhan et Stiegler [LG65][Sti94], la technologie a sa propre dynamique d'évolution, et a, en ce sens, créé l'humain en tant qu'espèce [LG65][Sti94]. Leroi-Gourhan comprend l'évolution technologique comme une relation de l'humain à la matière, où l'humain extériorise les formes techniques, et qui "invente" l'humain comme espèce. En effet, à partir du néandertalien, dit Leroi-Gourhan, le système cortical n'évolue pratiquement plus [Fau06] : l'équipement neuronal du néandertalien est assez semblable au nôtre. Or, depuis le néandertalien jusqu'à nous, la technique a extrêmement évolué : cela signifie que l'évolution technique ne dépend plus de l'évolution biologique. Le concept technique n'est pas inscrit d'avance dans une organisation biologique du cerveau. C'est en ce sens que l'on peut dire que l'hominisation est un processus d'extériorisation : l'espace de différenciation se produit hors de l'espace strictement biologique. Il y a une systématisme dans l'évolution de la technique, une sorte de "techno-logique" qui n'est pas entièrement humaine. Pour Leroi-Gourhan, il y a donc un dynamisme inhérent à la technique, elle-même productrice de nouvelles lignées et machines, et l'évolution technologique va plus vite que les sociétés humaines ce qui a pour conséquence que nous sommes constamment en train de rattraper notre retard. Pour Stiegler, qui reprend la thèse de Leroi-Gourhan, c'est la technique comme support de l'inscription de la mémoire, qui invente l'humain comme espèce, et ce à travers trois types de mémoires qui permettent à l'humain de se développer [Sti94]. Il y a d'abord la mémoire génétique, qui est celle de l'espèce et que l'on appelle aujourd'hui le génome. Il y a ensuite la mémoire épigénétique, qui est celle de l'individu. C'est celle qui est le produit de l'expérience

individuelle et qui est conservée dans le système nerveux central. Enfin, Stiegler ajoute la mémoire épiphylogénétique : ce terme fait allusion à cette caractéristique de l'homme de poursuivre son développement à l'extérieur du vivant lui-même, et ce, précisément grâce à la technique. Si l'outil, par exemple le silex, est fait pour découper, il se trouve que, par ailleurs, et spontanément, il est aussi un vecteur de mémoire. C'est pour cela que les archéologues peuvent, à travers les silex taillés, ou à travers des tessons de poterie, à travers des objets manufacturés quels qu'ils soient, reconstituer une civilisation.

C'est cette théorie de l'invention de l'humain par la technique et de la co-détermination de l'humain et de la technique que reprend quasi directement Engelbart : "The human system invents itself to better utilize the tool system ; this is the reverse of the liberal human perspective, where an originary human culture exists prior to and separate from technology." (cité [Bar06]). Pour lui, toute invention est une modification du "système humain", et ce système humain est ce qui nous équipe et nous permet d'utiliser les artefacts techniques. Ce qu'Engelbart suggère, c'est que la nature unique de l'homme est définie par l'utilisation d'outils ; toute action humaine est, d'une certaine manière, *technè*. Si certains, comme Hayles [Hay99] appellent cette perspective le post-humanisme, Engelbart l'appelle une "relation intégrée homme-machine" [Eng91], et cette intégration s'opère comme une articulation de systèmes de types différents, comme l'illustre la figure 2.5. Engelbart croit en particulier que la technique (qu'il appelle "the human augmentation system") se développe au-delà de nos capacités génétiques : en tant qu'humains, nous naissons dans une structure plus vaste, que nous faisons nôtre, ce qui rappelle un peu la dimension épiphylogénétique de Stiegler. Dans la figure 2.5, la zone centrale est une "capability infrastructure" : c'est le domaine où l'invention a lieu, et aussi la limite de ce qui est possible. Le système humain et le système technique sont en communication constante et évoluent dans le temps.

Il existe tout un champs de réflexions sur l'intégration humain-machine, avec notamment la problématique de la symbiose humain-machine (e.g. Licklider [Lic60]) (une autre alternative au post-humanisme qui maintient une distinction entre l'homme et la machine [Gir19]), ou bien sûr avec la cybernétique, puisque comme Norbert Wiener, avec la co-évolution du système humain et des systèmes techniques, Engelbart propose une explication systémique des structures humaines et sociales et de leur relation avec les technologies. Mais ce qui est à souligner c'est qu'il s'agit bien ici,

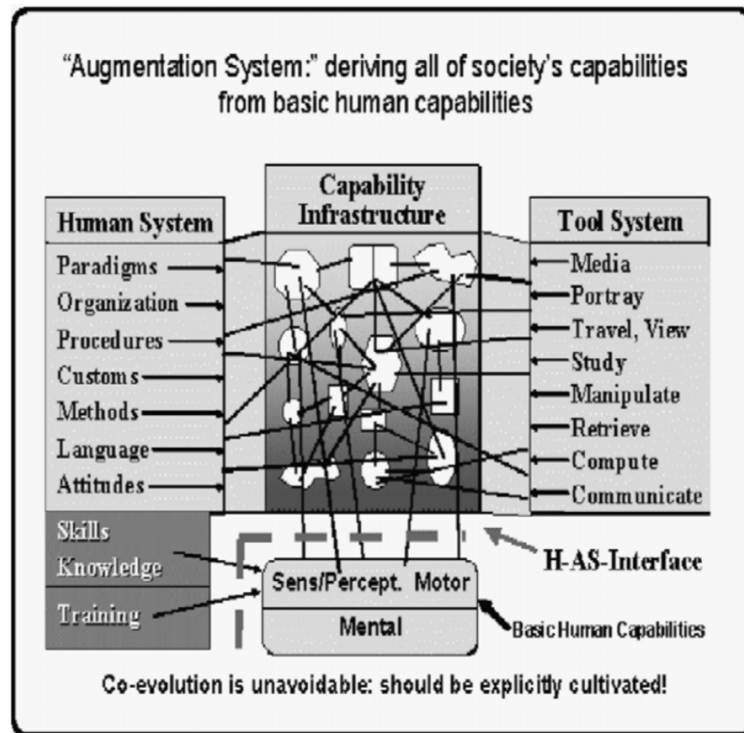


FIGURE 2.5 – The augmentation System

en s'appuyant sur cette référence à la co-évolution humain-technique, de la conception d'un système, et qui plus est, d'un système interactif fondateur de l'IHM. En effet, la conception de l'évolution humaine et technique a fondamentalement influencé l'approche de l'invention d'Engelbart dans les années 1960 et 1970. Cette conception d'un système d'augmentation repose en effet sur l'idée que jusqu'à présent, l'évolution a été déséquilibrée en faveur de la technique, et qu'il est possible d'orienter le cours du changement, de reprendre le contrôle, et ce, grâce à des principes de conception qui sont encore actuels en IHM.

It takes a long time (generations) to discover and implement all of the changes in the human system made possible by a given, radical improvement in technology. Where, as is the situation now, technology moves in large, rapid steps ... the human system will become critically stressed in trying to adapt rapidly in ways

that formerly took hundreds of years ... [t]he technology side, the tool system, has inappropriately been driving the whole. What has to be established is a balanced co-evolution between both parts. How do we establish an environment that yields this co-evolution? [EG88]

La conviction d'Engelbart de pouvoir influencer sur la co-évolution humain-technique repose également sur le principe d'apprentissage : les humains apprennent de la technologie ; ils acquièrent de nouvelles techniques et de nouvelles compétences à partir d'artefacts matériels, et ce processus n'est pas seulement souhaitable, il est inévitable. Engelbart estime ainsi que les humains peuvent et doivent apprendre à diriger les systèmes techniques, et plus généralement à contrôler la direction que prend la technologie, car il est possible, selon lui, de modifier la relation humain-technique, en faveur des êtres humains. Mais à une condition : la seule façon d'orienter cette dynamique évolutive est donc de *prendre conscience du processus lui-même*. Cela n'est sans doute pas par hasard que cette conviction provienne d'un chercheur fondateur de l'IHM. Mais la recherche en IHM a-t-elle conservé cette conscience du processus de co-évolution *anthropologique* de l'humain et de la technique ?

Il est à noter cependant que l'idée d'accroître le contrôle des humains sur les systèmes informatiques qu'ils utilisent en les modifiant eux-mêmes, en suivant les principes du développement par l'utilisateur final (EUD) [HPVW05], n'est pas explicitement mentionné. De manière surprenante, les principes d'augmentation et de co-détermination d'Engelbart sont plus souvent cités dans la littérature sur l'intelligence artificielle que dans la littérature sur l'EUD, à de rares exceptions près.

2.5 Matérialité de l'interaction

Il y a une tension plus ou moins explicite dans les réflexions sur l'interaction concernant sa nature, disons, "immatérielle". Les sections précédentes ont proposé des descriptions enrichies, élargissant la question de l'interaction à celle de la relation humain-monde. Mais, par exemple, peut-on parler de matérialité si l'interaction est avant tout une relation ? Comment la "saisit-on" ? Y a-t-il une explication de cette difficulté qui soit liée au retrait de la technologie dans la transparence de la relation incarnée ? N'est-ce pas justement du fait de sa matérialité qu'une incarnation et une transparence sont

possibles ?

Ensuite, cette question de matérialité est-elle légitime ? Qu'est-ce que la matérialité, du moins sur le plan de la technique et du design ? Est-ce seulement la question du paradigme tangible par exemple [SH10], avec l'occurrence d'un "material turn" dans l'évolution de l'IHM [Wib17] ? Y a-t-il une différence entre la question de la physicalité, de la tangibilité dans l'interaction et la question de la matérialité dans le design ? Je propose d'introduire cette réflexion par une description du statut de la matérialité dans l'ouvrage "Materiality of interaction. Notes on the materials of interaction design" de Mikael Wiberg [Wib17] paru récemment et présenté en keynote d'introduction à la conférence TEI'2018 (Tangible and Embodied Interaction) à Stockholm, et dans l'article "Digital Form and Materiality" de Jung & Stolterman [JS12] auquel le livre de Wiberg fait d'ailleurs référence sur le concept de matérialité. Le design semble en effet un bon point de départ pour poser les termes du problème, car, comme le déclarent Verbeek et Kockelkoren dans un article intitulé "Matter matters" qui affirme le tournant pragmatiste et matérialiste de la post-phénoménologie, le spectre de l'idéalisme platonicien hante le design [VK97] :

A spectre is haunting design : the spectre of platonism. [...] The very discipline that is almost entirely dedicated to matter and material culture, strangely enough seems to be trapped in a way of thinking that totally neglects materiality. [...] In both modernism and post-modernism, products are seen mainly as secondary, material shadows of something non-material that is considered primordial. [...] [in post-modern design] [P]roducts become icons, symbols or signs.

J'essaierai à ce propos de voir si on peut utiliser un très vieux concept issu de l'antiquité grecque (d'Aristote) : l'hylémorphisme (du grec ancien hylè : matière et morphè : forme) (section 2.5.4), pour démêler les questions abordées par Wiberg, Jung et Stolterman sur ce concept très complexe de matérialité. Cette présentation du concept d'hylémorphisme sera ensuite critiquée dans la section 2.7 présentant l'approche de Simondon (plus précisément 2.7.2).

Enfin, cette ambiguïté entre une physicalité des objets, une "épaisseur" des interactions, et la mise en avant du sens se retrouve d'ailleurs également dans l'interaction tangible et incarnée, nous en discutons brièvement ci-dessous (section 2.5.3).

2.5.1 Matérialité et composition

L'exploration de la matérialité de l'interaction proposée par Wiberg dans son ouvrage "The materiality of interaction" [Wib17] mets en avant plusieurs dimensions : la matérialité à travers une opposition de l'informatique comme *représentation* du monde vs une informatique *dans le monde*, (exemples du monde devenu un milieu technique : ubiquitous computing, embedded systems, ambient and pervasive computing, tangible computing) ; les propriétés matérielles des objets physiques utilisés dans le design ; les méthodes et outils de fabrication, avec le making ; la proposition d'un paradigme de la composition pour le design d'interaction.

Les dimensions de la matérialité qui intéressent l'auteur sont ainsi : *le réel* en général, notre monde matériel et social, opposé à sa représentation ("not the real thing"), les *objets* physiques intégrés dans ce monde réel, les propriétés et l'*apparence* des objets, les *manifestations matérielles* de l'interaction résultat d'un design, les *matériaux* physiques utilisés (bois...), intelligents ou non, la *forme*, perceptibles à travers les catégories d'objets, les dimensions de design (comme la forme physique), les catégories de matière (e.g. physique/numérique ou réel/virtuel), et enfin tous les éléments, les formes en tant qu'ils sont des *éléments d'une composition*, et qu'ils permettent de produire un design, qui le composent, qui peuvent être numériques aussi (matériaux physiques et/ou intelligents, AR, IoT, frameworks, bibliothèques et composants logiciels, dispositifs, machines, ...).

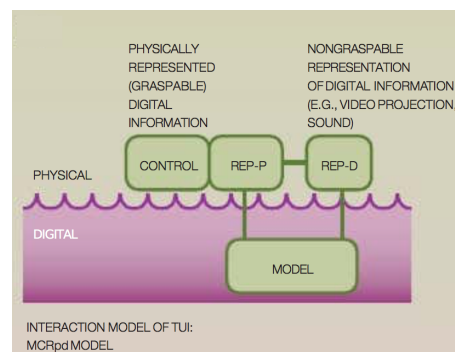


FIGURE 2.6 – Le modèle tangible représentationnel MCRpd [UI00]

Ces instances de matérialité sont analysées à l'appui du "Material turn" du design dans les deux décennies précédentes, où le design et l'IHM se

départissent de l'informatique représentationnelle, passent des métaphores aux matériaux, de la représentation à la présentation, avec une intégration du numérique dans le monde, en créant des chemins entre des catégories (des formes) distinctes de matière (e.g. physique/numérique) [KKL14], où les ordinateurs deviennent aussi objets physiques soit comme éléments d'une composition, soit comme objets (e.g. smartphone) ayant un "form factor" comme les autres.

A noter que selon [Wib17], la physicalité dans les TUI (Tangible User Interfaces) (e.g. Ullmer & Ishii 2000 [UI00]) reste dans le paradigme de l'informatique comme représentation du réel, puisqu'il s'agit seulement de physicaliser la représentation (fig. 2.6). Un dispositif comme l'*Indoor Weather Stations* [HOWV18] qui permet de visualiser soit des bouffées d'air passant par un petit tunnel, soit la température par une couleur affichée sur des bandes sérigraphiées, bien qu'il crée un type de relation herméneutique [Ihd90], où le monde est représenté par la technologie, sort néanmoins du paradigme de l'informatique représentationnelle du fait de proposer des objets qui ont leur intérêt et leur forme propres et qui ont leur place parmi les accessoires d'une habitation. D'ailleurs l'*Indoor Weather Stations* peut parfois aussi participer d'une relation d'arrière-plan, comme quelque chose qu'on ne va remarquer qu'en son absence.

Il est intéressant de noter que cette réflexion sur la matérialité de l'interaction menée par Wiberg ne consiste pas à creuser un aspect d'un concept qu'il considère par ailleurs comme très bien défini. C'est en réalité selon lui la matérialité de l'interaction qui définit cette dernière : la question de la matérialité de l'interaction *est* la question de l'interaction dont nous avons initialement fait une brève revue (section 2.3). La réponse à la question "What is interaction?" est ainsi clairement donnée à la fin du chapitre "Materiality of interaction" : plus qu'une série de turn-taking (tours de rôle), elle est intégrée dans un contexte de pratiques, produit du sens à travers l'utilisation d'une écologie d'objets selon des patterns, des contournements, des pannes, etc. C'est un caractère à nouveau relationnel qui ressort de cette définition. Il faut avoir conscience du fait que cette approche du design d'interaction a pour conséquence en réalité que mieux la matérialité de l'interaction est conçue, plus la technologie disparaît (ce qui n'est pas contradictoire avec la dimension de transparence).

Si la définition de la matérialité de l'interaction de Wiberg s'inspire en grande partie de l'article de Jung & Stolterman [JS12], présenté ci-après (section 2.5.2), il faut cependant remarquer que les principaux chapitres de cet

ouvrage sont consacrés au concept de composition qui est à mon avis la vraie contribution de cette recherche. En effet, d'une part, à travers le questionnement de la matérialité, il fait le lien entre interaction et conception, et d'autre part ce concept de composition semble incontournable si on réalise que le mot "matière" a aussi pour sens "ce dont est fait" quelque chose, décrivant un processus où sont "composés" des "éléments". Dans ce processus, les éléments, quelle que soit leur catégorie, physique ou numérique, sont manipulés, explorés, choisis, compris avec leur mécanismes, acceptés avec leurs contraintes, intégrés, architecturés, organisés dans des activations, et ce détail, ainsi que le travail et les processus induits à ce niveau de détails, constitue (aussi) la matérialité de l'interaction. Est également soulignée la manière dont les éléments de la composition *commandent* cette composition, phénomène bien connu de tout designer qu'il soit architecte système, designer d'interaction, développeur logiciel :

Even though this might seem counterintuitive, focusing on materials in the design of interactive user experiences is a relational approach to interaction design that has one keen eye on user needs and another on materials that can enable a preferred interaction design.

Selon Wiberg, le caractère relationnel de l'interaction a à voir avec la manière dont se forme la matérialité de l'interaction, par des relations entre des éléments et la manière dont ils sont reliés ensemble puisqu'il s'agit de construire l'interaction à la fois sur des processus d'utilisation et des processus de calcul, de manière non linéaire. A noter enfin, un des intérêts de cette acception de la matérialité de l'interaction comme composition est qu'elle ouvre la question liée à la composition qui se produit dans l'utilisation, à une échelle différente de la conception, l'une étant possible comme modèle de l'autre dans la conception participative.

2.5.2 Forme numérique et matérialité de l'interaction

Dans un article intitulé "Digital form and interaction materiality", Jung & Stolterman constatent que les approches user-centered design ne permettent pas d'exploiter correctement les qualités expérientielles et esthétiques des artefacts numériques [JS12]. Ils font l'hypothèse qu'une approche fondée sur les concepts abstraits de *forme* et de *matérialité* permettrait d'améliorer la prise en compte des qualités matérielles de design. Cette approche tente de

réunir les problèmes du comment concevoir et et du comment utiliser, et se résume ainsi :

All different perspectives about how things are made and used, juxtaposed together, could expand the meaning of digital artifact from functional device to material object, which involves the process of being made and used in various contexts of use.

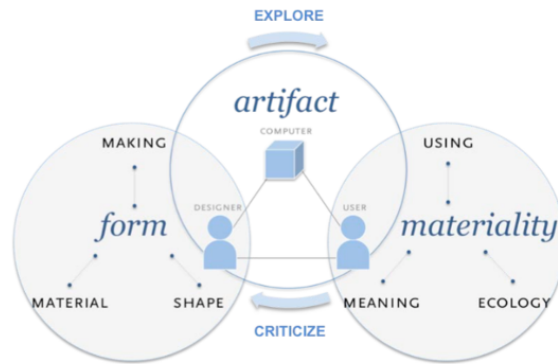


FIGURE 2.7 – Digital form and interaction materiality [JS12]

Dans l’approche de design qui est proposée, et comme l’illustre la figure 2.7, le principe est de penser le lien fort entre la forme et la matérialité. La problématique de la fabrication (making) est pensée en termes de forme pour inclure aussi bien la dimension de la forme des objets (shape) que la prise de forme opérée à partir des matériaux et en partie dirigée par eux. C’est le versant ”intentionnel” dans lequel la forme est considérée comme une unité *organique*, réunissant technologie, intention de conception et engagement humain dans le processus de fabrication. La composante utilisation est pensée pour sa part en termes de matérialité dans le sens où, comme le soulignent les mouvements de la ”material culture” [Mil98] et de la philosophie de la technique, l’artefact matériel génère par lui-même des usages, faisant plus en réalité que ce pour quoi il est initialement conçu, s’accompagnant de la co-construction d’une *écologie* technologique et humaine, individuelle et sociale, induisant des *significations* multiples.

” The theoretical foundation described earlier underscores that form and materiality do not only denote what things are made

of or look like, but also indicate how technology is presented in human life, deeply affecting our personal as well as social interaction. In particular, they highlight how form and materiality are tightly associated with each other through the process of making and using an artifact. Specifically, the linkage between the qualities intended in design (as discussed in terms of form) and those evoked in use (as discussed in terms of materiality) is considered as a vital design issue in order to support more engaging and meaningful relations between people and things. ”

Ce que les auteurs entendent par lien est non seulement un lien entre des qualités mais consiste aussi à brouiller la frontière entre les rôles typiques des concepteurs et des utilisateurs en incluant plus activement les deux parties dans le processus de fabrication dans un cycle itératif d'exploration et de critique (au sens des valeurs [BB08]). Les approches de développement par l'utilisateur et de bricolage sont évoquées dans ce processus.

Le fait de mettre en correspondance forme et matérialité de cette manière est assez intrigant, et si l'on explore le parcours réflexifs des auteurs autour de ces notions on peut constater une certaine instabilité. En effet, dans un article court précédent [JS11], les auteurs, constatant l'importance croissante de la forme dans la conception et l'utilisation des artefacts interactifs, proposaient à la fois 1) d'identifier des *types de formes* (formes cognitives, incarnées, expressives, et exploratoires), 2) de repérer diverses *formes d'artefacts* (téléphones mobiles, lecteurs de musique, jeux, architectures interactives ou arts médiatiques, etc au-delà des des écrans plats des ordinateurs de bureau), et diverses formes d'interactivité (tangibile, organique, matériaux intelligents) et de 3) décliner trois façons d'utiliser la forme en design (form as variation, form as desire, form as medium). Pour donner un peu de détails, le type de forme cognitif est celui où l'information et/ou la fonction existent au préalable avec la forme qui constitue leur représentation visuelle ou textuelle, le type de forme incarnée correspond aux objets se manifestant dans le monde en faisant partie de ce dernier, le type de forme expressif concerne le style ou l'expression de soi (mode...), et le type de forme exploratoire est à visée expérimentale, pour explorer le potentiel esthétique des objets numériques. Par ailleurs la forme comme variation désigne un travail d'élaboration de qualités esthétiques ; avec la forme comme désir l'idée est que la forme ne suit pas nécessairement les besoins de l'utilisateur, mais reflète parfois et même crée le désir humain ; enfin la forme comme medium consiste à faire participer les

utilisateurs à la (re)fabrication, elle est destinée à laisser ouverte et ambiguë la signification d'un objet.

Enfin, dans un autre article publié plus récemment [JWWS17], et rassemblant plusieurs des auteurs cités dans cette section, c'est encore une autre définition de la forme qui est donnée, qui retravaille la notion de forme à travers le concept de "hybrid morphologies", incluant les métaphores, l'anatomie et les affordances. Cette réflexion amène une nouvelle formulation de la forme (eidos) : "The form of interactive artifacts consists of their surface, behavior and system" et surtout propose une théorisation explicite de la prise de forme (le design comme "form-making") avec une prise en compte pragmatique des niveaux et des aspects variés de la matérialité (voir section 2.7.2).

Ce qui est donc à noter, c'est que ces concepts de forme et de matière donnent lieu à une réflexion importante, et présentent pour le moins une certaine instabilité. Certaines acceptions de la matérialité chez Wiberg se sont ainsi retrouvées du côté des types de forme chez Jung & Stolterman [JS11] puisque par exemple l'informatique incarnée dans le monde réel vs l'informatique représentative rejoint l'opposition entre type de forme cognitive et incarnée. Ou encore, entre l'article de 2011 et celui de 2012 de Jung & Stolterman, on peut constater que le sens est passé du côté forme au côté matérialité. Enfin comme nous venons de le voir la forme exige une conceptualisation assez complexe, depuis la catégorisation des objets jusqu'à la catégorisation des processus.

Ce qui me semble toutefois important c'est *le besoin de spécifier un processus* qui s'exprime dans ces concepts, un processus qu'on pourrait désigner comme une "prise de forme", qui opère des assemblages, des liens, des déplacements, des transformations (d'intentions, de propriétés), ainsi que des changements d'échelle, par exemple depuis des propriétés matérielles comme contrôle du making jusqu'à la matérialité des artefacts et leur efficace culturelle, ou depuis le sens recherché par le designer vers le sens qui se développe dans l'écologie des artefacts socio-techniques et des usages. Un autre point qui me semble à souligner est que, même en faisant selon les auteurs le choix de penser forme ou le choix de penser matérialité, il est difficile de penser l'un sans l'autre, et que cela correspond à une structure réflexive assez ancienne qui s'appelle l'hylémorphisme que je décris dans la section suivante.

2.5.3 Interaction tangible et incarnée et matérialité

La sensibilité au paradigme d'interaction tangible [SH10][HB06] est devenue assez courante en IHM depuis une dizaine d'année. Il faut distinguer dans ce paradigme des approches assez différentes, avec notamment les interfaces tangibles qui sont des représentations physiques des objets numériques [UI00] et l'interaction tangible et incarnée [Dou01], qui souligne plus particulièrement l'intégration de l'interaction dans le monde. A ce titre, l'approche incarnée est proche d'une théorie de la médiation comme la post-phénoménologie, même si dans le cas de Dourish c'est plutôt la théorie de la perception de Gibson [Gib86] qui lui permet de penser la perception comme relation au monde. L'ouvrage de Dourish, notamment dans le chapitre "Being in the World" du livre "Where the action is" [Dou01] souligne que la notion de familiarité qui est présente en IHM avec l'usage de métaphores ne suffit pas : il faut pouvoir conceptualiser le réel comme *medium* (e.g. la manière dont les outils sont intégrés dans une certaine pratique sociale) et non pas seulement comme métaphore. La phénoménologie intéresse cette approche parce qu'elle invoque le sens, comme inhérent au réel : "Embodiment is the property of our engagement with the world that allows us to make it meaningful". L'approche incarnée est aussi associée à des méthodes qui remplacent les processus problèmes-solutions en processus où des concepts tels que l'exploration, l'improvisation, l'apprentissage par la pratique, l'expérience personnelle, l'affect, les contraintes, les possibilités et les couplages jouent un rôle de premier plan.

En termes de matérialité, les interfaces tangibles reposent clairement sur l'idée de construire des représentations physiques, c'est-à-dire des objets, pour les représentations numériques (fig. 2.6). Dans l'approche de Dourish, la matérialité reposerait plutôt sur le réalisme d'une intégration relationnelle au monde réel faisant sens. Hornecker rassemble les différents thèmes de l'interaction tangible dans un framework incluant la manipulation physique directe et fine, l'interaction dans un espace physique reconfigurable, les facilitations incarnées et les représentations expressives, thèmes dont le point commun est qu'ils sont tous liés à la matérialité d'une manière ou d'une autre (celle de l'espace où nous vivons et agissons, celle du corps, celle des objets physiques, celle de la perception).

On constate chez Dourish une certaine prise de distance avec les problématiques liées à la technicité du corps, aux habiletés incarnées, aux liens entre corps et technique, en faveur d'une sensibilité phénoménologique sur la perception et l'engagement dans le monde. La thématique

phénoménologique du corps comme entre-deux, comme chiasme [MP64]⁵, n'est pas abordée. Enfin, aucun des aspects concernant le statut fluctuant corps-technique, de même que la matérialité, le mode d'existence des objets techniques, leur organicité, et leur lien avec l'humain et le geste dans l'évolution, n'intéresse la recherche en interaction tangible. On verra un exemple de conceptualisation permettant de penser le lien entre la technicité et le sensible dans la section 2.7.3.

2.5.4 L'hylémorphisme

La description proposée par Mitcham de la technè grecque est très éclairante quant à la détermination des dimensions à l'œuvre et au statut de la matière dans la création d'un objet technique ou artistique [Mit94].

Que ce soit pour Aristote ou pour Platon, il faut tout d'abord souligner le fait que du savoir (logos⁶) intervient dans la technè, ce qui n'est pas le cas de toutes les activités manuelles, comme la cuisine routinière, qui ne font intervenir que l'expérience et n'ont pas conscience de la nature (phusis) et des causes (aition) de ce qu'elles sont en train de faire. Pour Platon, toutes les activités humaines dont on peut parler et au sujet desquelles on raisonne relèvent de la technique, et il exclut de ces activités celles qui se font toutes seules, y compris la création sous inspiration divine "inconsciente". La connaissance qui intervient dans la technique est donc celle de la nature interne des choses, qui permet de conduire la conception⁷ (poïesis). La technè est ainsi une activité ou une capacité d'action faisant intervenir un savoir spécial du monde, une conscience, qui informe la production, quelque part dans un vaste continuum entre les impressions sensorielles et le savoir théorique. La technique est ainsi définie comme un type de connaissance du monde qui permet à l'humain de s'accorder au monde, entre l'expérience (emperia) et la science (épistémè). Selon la définition d'Aristote, la technè est une disposition à agir d'une certaine manière⁸, impliquant un temps d'apprentissage, un exercice

5. "L'épaisseur du corps, loin de rivaliser avec celle du monde, est au contraire le seul moyen que j'ai d'aller au coeur des choses, en me faisant mon et en les faisant chair." et "Le corps interposé n'est pas lui-même chose mais sensible pour soi donc sensible exemplaire, qui offre à celui qui l'habite et le sent de quoi sentir tout ce qui au-dehors lui ressemble, de sorte que, pris dans le tissu des choses, il le tire tout à lui, l'incorpore"

6. on parle bien de logos (raison, conscience) et non d'épistémè (connaissance systématique, pure, théorique et même mathématique pour Platon)

7. conception ou production, plus que création qui a une connotation religieuse

8. hexis, habit en anglais, habitus en latin

au sens d'une pratique pour s'exercer. Cette disposition est pourvue d'une rationalité (logos) du faire et de l'objet qu'on fabrique, logos qui est une connaissance (gnosis) des causes (aition) qui conditionnent la fabrication, et qui se constitue parfois de langage. A ce titre, Mitcham insiste sur le fait que l'explication du faire technique repose sur les quatre causes distinguées par Aristote : la cause matérielle, *ce dont* est fait l'objet (hylè), la cause finale, *ce pour quoi* est destiné l'objet (telos), la cause formelle, le *modèle* de l'objet (eidos), et la cause efficiente (aition), *l'action* contingente de fabrication de l'objet par l'artisan. Aristote ne limite donc pas la technique au seul acte de fabrication.

En ce qui concerne en revanche une science de la technique (logos), en dehors des connaissances scientifiques qui peuvent s'avérer nécessaires comme l'arithmétique, même si Aristote s'efforce de penser le faire, et plus généralement le devenir, la seule dimension rationnelle qui peut en être partiellement saisie est la forme (eidos) (celle de la cause formelle). La manière de faire échappe en partie à la description rationnelle et repose sur une sorte de confiance (pistis) et de disposition mentale. La matière échappe également au logos technique, dans le sens où chez Aristote celle-ci est la part négative qui résiste toujours au logos qui ne porte, quant à lui, que sur la forme. Cela n'empêche pas Aristote de proposer une description de la technè qui distribue clairement les rôles dans les dimensions à l'œuvre dans la fabrication (Physique, livre II, chapitre 3 [Ari00]). Selon lui l'engendrement à la fois de la forme physique (morphè, shape) et du concept (eidos, form) se produit dans la matière (hylè) par un mouvement (dunamis). C'est l'âme en possession de cette forme de savoir du concept qui effectue ce mouvement, par exemple avec les mains qui opèrent sur les outils qui à leur tour mettent la matière en mouvement. Une certaine connaissance de la matière (hylè) est impliquée dans cette opération, mais seulement jusqu'à un certain point : la matière n'est accessible rationnellement que par sa participation à cette mise en forme. En revanche, c'est elle, avec ses possibilités, que l'artisan a intérêt à connaître, c'est elle qui contrôle et qui guide le faire (poiesis), comme si la matière acceptait ou désirait le résultat de la fabrication : on ne peut pas forcer la forme sur la matière. Enfin, le guidage final de la création fait intervenir le jugement sensible (aisthesis).

On pourra remarquer qu'une esquisse des mécanismes de ce "how to", esquisse qui fait également intervenir une motricité originare, est proposée dans l'ouvrage "Imagination et invention" de Simondon avec le cycle des images (voir chapitre 6, section 6.3.2) [Sim08], et nous y reviendrons par la

suite (2.7 et 6).

Si on fait le bilan de ce qui "relève de la matière" dans la technè grecque, du moins tel que cela a été identifié dans les descriptions de designers (section 2.5) il y aurait donc les concepts de hylè (cause matérielle, matériaux), morphè (forme *physique* adoptée par l'objet, structure, etc...), cause efficiente (acte *physique*, mouvement de l'artisan). Ce qui "relève de la forme" chez les designers seraient en revanche plutôt la cause formelle (eidos, modèle, vision) et la forme physique (morphè, shape). Il est intéressant d'identifier des correspondances entre ces concepts et ceux qui sont invoqués dans la description de la matérialité de l'interaction de Wiberg. Avec le paradigme de la "matérialité comme composition" - composition c'est-à-dire poïesis, engendrement - c'est le processus de prise de forme dans sa globalité qui est désigné comme matériel, et comme reposant sur une maîtrise pratique des matériaux (materials) divers (logiciels et matériels) dans la mise en œuvre, avec bien sûr une analyse de l'importance accrue de la forme physique (morphè, shape) des interfaces [Wib17] (cf 2.5.1), et une vision (eidos). Dans le cas de Jung & Stolterman [JS12], l'hylémorphisme se cache dans la partie gauche du schéma, partie intitulée "form" (fig. 2.7). Le rôle de "cause matérielle" est parfaitement identifiable dans le concept de "digital materials" tel qu'on le trouve par exemple chez Wiltse [Wil14] où il correspond aux substrates, à tous les composants matériels ou numériques qui sont dans un système et dont il faut comprendre le fonctionnement de fait (par opposition au comportement documenté) pour être capable d'interpréter ce qui est perceptible. Ce qu'on désigne par "matériel" est ainsi bien souvent le substrat, les éléments, ce dont est fait le système, dont on subit les contraintes, ce qui "commande", ne serait-ce qu'en définissant l'ensemble des possibles (la matière comme ce qui est en puissance - dunamis).

On retrouve à nouveau une instabilité dans les correspondances conceptuelles identifiées dans le discours du design, ce qui est normal dans la mesure où personne dans ce domaine ne fait jamais appel aux quatre causes d'Aristote et au schème hylémorphique⁹, même si à mon avis il clarifie le

9. La cause matérielle d'Aristote est invoquée chez Declerck pour comprendre le caractère de contrainte et de "résistance" que constitue la réalité physique dans le processus de construction de la relation au monde : «Si l'on accepte de considérer la préexistence, dans la réalité physique, d'un espace purement potentiel, celui-ci nous semble donc pouvoir être considéré, relativement à l'espace dont nous avons l'expérience et qu'il nous faut construire, comme une forme de contrainte. [...] Mais cette réalité physique doit ici être pensée, non comme l'original dont il s'agirait pour l'homme de produire une copie fidèle

problème. Mais ce qui est important est en revanche l'idée d'une dualité "matière/forme" mise en tension dans la production, peu importe en réalité la véritable définition de ces deux termes, s'il en existe une. C'est la raison pour laquelle je vois dans ces efforts de conceptualisation [JS12][Wib17] essentiellement besoin de spécifier un processus, le processus de "prise de forme". La critique du schème hylémorphique par Simondon propose de surmonter cette dualité forme/matière "prise de forme" en explicitant les raisons de cette instabilité conceptuelle (section 2.7.2).

2.6 IHM et philosophie

Le but de cette section, après avoir présenté des éléments théoriques issus de travaux en IHM, est de faire le point sur les positionnements possibles entre l'approche théorique en IHM et le corpus assez riche proposé par ce qu'on appelle la philosophie de la technique.

2.6.1 Philosophie de la technique

La philosophie de la technique (philosophy of technology) est un domaine qui s'intéresse, pour le résumer très brièvement, à de nombreux sujets tels que la classification des objets techniques (outils, machines, instruments, ...), les méthodes d'invention, de design ou de production, l'analyse épistémologique des sciences de l'ingénierie, le statut ontologique des artefacts techniques par rapport aux entités naturelles, ou les questions éthiques et politiques posées par le développement de la technique.

Mitcham [Mit94] propose une discussion qui est intéressante pour l'IHM concernant la pertinence et la prééminence de deux façons de considérer la philosophie de la technologie. L'une d'elle, "engineering philosophy of technology" ou EPT, est une "philosophie de la technique de l'ingénieur" (tout comme il y a des "sciences de l'ingénieur"), qui cherche à conceptualiser les objets et les phénomènes techniques eux-mêmes. Elle est issue d'ingénieurs,

ou pour le moins utilisable dans son système de représentation personnel, mais comme une matière, au sens où l'entend Aristote : ce qu'est la réalité, entendue comme matériau du monde perçu, c'est tout ce que les mondes perçus construits sur sa base peuvent être - tout de même que le célèbre bloc de marbre d'Aristote se définit, dans sa fonction de cause matérielle, par "toutes les statues qui peuvent être taillées à partir de lui" > [Dec10], p 31.

ou parfois de sociétés savantes d'ingénieurs, qui souhaitent construire un savoir philosophique sur la technique dont ils sont praticiens. C'est le cas par exemple de Reuleaux avec sa théorie générale des machines [Reu76]. L'autre, "humanities philosophy of technology" ou HPT, est une branche de la philosophie qui s'intéresse à la technique, dont l'objectif est plutôt pour les philosophes de se positionner par rapport à la technologie (parmi les exemples souvent cités : Heidegger [Hei58], Ellul [Ell77], Borgmann [Bor84]) ou Stiegler [Sti94]). Par ailleurs, l'approche pragmatique de Dewey ou de Don Ihde représente une tentative de réconciliation entre ces points de vue, avec une approche concrète et non uniquement technophobe de la technique par des philosophes. Plusieurs travaux en philosophie contemporaine de la technique, notamment à la suite de Simondon [Sim58] proposent ce type de réflexion (e.g [Guc10][Bon16c][MD14][Duh16a]).

Cette distinction entre EPT et HPT me semble pertinente pour évaluer si il est utile de s'intéresser à la philosophie de la technique en IHM, puisqu'en effet on peut considérer les théorisations de IHM comme un exemple d'EPT, ou du moins car il n'y a pas que des ingénieurs en IHM, comme un possible exemple d'une pensée, d'une philosophie issue de la pratique en IHM, qu'on trouve d'ailleurs plus particulièrement dans le versant design de la communauté (Fallman, Stolterman, etc). Mitcham qui rend compte à égalité des deux approches (EPT, HPT), développe cependant les arguments qui pourraient donner la prééminence et la précedence à la philosophie "humaniste" (HPT) comme étant plus inclusive que l'approche "pratique" (EPT) : c'est HPT qui conceptualise EPT et non l'inverse ; HPT est plus globale notamment en proposant une perspective d'histoire et d'évolution de la pensée ainsi qu'une conception de l'humain dans sa globalité (contrairement par exemple à Reuleaux qui ne parle que de machines - cité d'ailleurs par Blackwell concernant les dimensions cognitives de la programmation tangible [Bla03]). Si cette sensibilité humaniste est très présente en IHM, il n'est pas faux de dire qu'en effet l'IHM tient assez peu compte dans ses théorisations de l'histoire plus globale des interactions entre humain et technologie, à part certaines exceptions notables [Eng62], ce qui la situe plutôt du côté EPT.

Comme l'explique Mitcham, le problème d'une philosophie de la technique, qui est aussi celui d'une philosophie de l'IHM, est le statut épistémologique des connaissances que la technique (ou l'IHM) produit. En philosophie des sciences, et il plus simple de distinguer les savoirs scientifiques (la relativité restreinte, l'évolution des espèces, ...) des savoirs à propos de la science (épistémologie : statut de la vérité, structure des théories scienti-

fiques, ...). En philosophie de la technique, l'aspect pratique, et le fait que la technique s'évalue par le bon fonctionnement plus que par la vérité de ses productions [MF97], induit l'idée que la technique semble seulement une application de la science, et c'est un peu ce que laisse à penser l'article de Rogers [Rog04]). Mais la technique produit également des savoirs, comme le décrit Mitcham :

[...] the concepts of a switch, invention, efficiency, optimization ; the theories of hydraulics and aerodynamics, of kinematics and cybernetics, of queuing, information, and network theory - these are all inherently technological. Such ideas are found not in the sciences of physics, chemistry or biology, but in the disciplines of mechanical, civil, electrical, electronic and industrial engineering.

Sans reprendre le corpus épistémologique des techno-sciences qui a beaucoup développé cette problématique et dont l'état de l'art dépasse largement l'objectif de ce chapitre [BVL18][Hot84][Fee02], on voit bien qu'il existe un savoir ou une science technique, ce que Simondon nomme techno-logie (logos comme science) [Bar15] [Sim58]. L'existence d'un savoir propre s'applique à l'IHM, avec par exemple analyse des méthodes de conception et les définitions qui décrivent les phénomènes autour de l'interaction et qui peuvent informer la conception (section 2.3), et qu'il reste *en plus* de la place pour ce qui serait une philosophie de l'IHM qui serait réflexive par rapport à cette technologie. Pour reprendre les sujets de la philosophie de la technique, il s'agit par exemple de classification des objets interactifs [FRHC18], d'analyser le statut ontologique des artefacts interactifs, de comprendre le phénomène de conception d'un point de vue anthropologique, ontologique ou philosophie, ou d'envisager les questions éthiques et politiques posées par le développement des systèmes interactifs.

2.6.2 Développement de la philosophie en IHM et en design

L'utilisation de la philosophie se développe en fait depuis quelques années en IHM et en design autour de deux axes. Le premier tend à l'utilisation de concepts tels que ceux de la phénoménologie [Sva13a] ou comme on l'a vu précédemment de la post-phénoménologie [HOWV18] pour décrire et comprendre des phénomènes autour de l'interaction, ou encore à la philosophie de Simondon [Gir21]. L'autre axe s'intéresse plutôt à l'aspect axiologique avec

des questions sur l'éthique et les valeurs. C'est par exemple le cas de Fallman qui expose comment s'appuyer sur Don Ihde et Borgmann (qu'il suggère comme plus accessibles et plus près de l'IHM) pour les questions de design durable, de undesign, d'attachement [Fal11]; un autre exemple est Bardzell avec le Critical HCI, qui représente un tournant culturel de l'IHM [Rog04], s'intéressant aux valeurs en apportant une réflexion humaniste [BB08] (aspect HPT de la philosophie en IHM). La philosophie se développe aussi sur un plan "culturel" en IHM (comme ensemble des savoirs et valeurs partagés) : une page est consacrée à la philosophie de l'interaction dans l'encyclopédie en ligne de l'IHM [Sva13b], et des workshops ont été organisés dans le cadre des grandes conférences. J'ai participé en 2019 [Let19] au workshop intitulé "Standing on the Shoulders of Giants : Exploring the Intersection of Philosophy and HCI" [SKB⁺19], titre qui indique une orientation HPT intégrant la pensée des grands philosophes, mais aussi EPT puisqu'il était question d'explorer une intersection, supposant qu'une partie de l'IHM est d'une nature non étrangère à la philosophie. A noter, il existe une intersection en France entre IHM et philosophie, avec par exemple des travaux en épistémologie de l'intégration humain-machine [Naz19][Gir19], ou à l'ENAC en épistémologie de l'interaction [MC15], etc. Des travaux sur les relations humain / technique / société sont menés au laboratoire Costech de l'Université Technologique de Compiègne présentant une intersection avec l'IHM par exemple sur les aspects design (design éactif) ou écriture et interaction. Enfin la philosophie est très présente en design, avec des courants divers, tels que le courant simondonien [Bon16a][Bon16c][Car16b][Car16a] ou pragmatiste [Dal14].

2.6.3 Penser l'usage ? Retour vers une techno-logie de l'IHM.

Une des lignes de démarcation potentielle très frappante entre philosophie de la technique et IHM, dont je ne crois pas qu'elle ait jamais fait l'objet de publication spécifique, est celle du statut philosophique de l'usage des objets technique. Une grande partie des auteurs en philosophie de la technique, tels que Heidegger, Simondon, Don Ihde, affirment le caractère non essentiel de l'usage pour conceptualiser les objets techniques, ce qui est presque choquant pour un praticien de l'IHM. Pour Simondon, l'usage - il faut en fait comprendre : la fonction, l'utilité - n'apporte aucun élément quant à l'essence, la signification d'un objet technique. Il ne permet pas de le com-

prendre. L'exemple bien connu [Sim58] tiré du "Mode d'existence des objets techniques"¹⁰ est celui des moteurs, qui, pour une même fonction, exhibent des mécanismes différents :

Un même résultat peut être obtenu à partir de fonctionnements et de structures très différents : un moteur à vapeur, un moteur à essence, une turbine, un moteur à ressort ou à poids sont tous également des moteurs ; pourtant, il y a plus d'analogie réelle entre un moteur à ressort et un arc ou une arbalète qu'entre ce même moteur et un moteur à vapeur ; une horloge à poids possède un moteur analogue à un treuil, alors qu'une horloge à entretien électrique est analogue à une sonnette ou à un vibreur.

et ce, même si la signification de l'objet technique est aussi tirée du rapport entre deux fonctionnements rendu possible par l'usage :

L'usage réunit des structures et des fonctionnements hétérogènes sous des genres et des espèces qui tirent leur signification du rapport entre ce fonctionnement et un autre fonctionnement, celui de l'être humain dans l'action.

Mais il faut sans doute ici différencier le mot usage comme "utilisation effective" qui réunit des fonctionnements, et l'usage comme "utilité", ou "fonction" qui détermine les buts de l'objet technique.

On retrouve le même positionnement en post-phénoménologie : à la suite de Ihde [Ihd90] Hauser et al [HOWV18] déclarent vouloir aller au-delà du focus sur l'utilité et les fonctionnalités techniques : une approche principalement utilitaire peut en effet occulter la compréhension des relations que les humains entretiennent avec la technologie et de la manière dont la technologie façonne les expériences humaines dans le monde. Pour comprendre ce point de vue, il faut sans doute rappeler que tant en post-phénoménologie que parfois en design, la conception des interactions est assimilée à une conception fonctionnelle : "As a result, there has been emerging interest in the HCI community in expanding focus *beyond interaction* and functionality." [HOWV18]. Dans la conception de fonctions, le "comment" est négligé au profit du "quoi", alors que dans de nombreux cas, constatent cependant les post-phénoménologues, les objectifs et intentions n'existent pas indépendamment des technologies utilisées, par exemple [Ver15] :

10. désigné par "MEOT" dans la littérature

Social media has generated new types and dimensions of social relations that were not intended in the design of the technology, but rather emerged from them.

D'une manière similaire, les travaux en théorie du design d'interaction dont certains cités ci-dessus (2.5.2) opposent une approche fonctionnelle centrale en IHM, orientée par les besoins de l'utilisateur, à une approche qui s'intéresse à l'artefact lui-même comme vecteur d'exploration des valeurs et des lignes matérielles, tendu entre forme pensée et intention du designer et alignement au réel dans l'usage. L'artefact apparaît ainsi comme totalement "utilitaire" dans la démarche centrée utilisateur - utilitaire même dans le processus de conception puisque les prototypes intermédiaires ont bien une "fonction" qui les dépasse, fonction de filtre, fonction d'exploration, d'apprentissage, de manifestation [LST08]. Contrairement à l'aspect totalement

Ce retour vers l'objet, que ce soit en post-phénoménologie ou en design, s'opposant à un rôle fonctionnel, n'est pas sans rappeler inversement le statut "retiré" et "transparent" de l'outil technique reconnu dans les principes d'incarnation [Hei27][Ihd90]. S'intéresser à l'objet technique, comme le fait la philosophie de la technologie et comme le proposent souvent les designers, c'est bien sortir de la problématique utilitaire pour l'analyser en lui-même, pour trouver en lui ce qui échappe au fonctionnel, ce qui relève en quelque sorte de ce qu'on essaye d'identifier comme une matérialité, une épaisseur irréductible, des principes de fonctionnement, d'évolution et une logique propre au sein du réel. Il suffit alors de bien s'entendre sur le mot usage car il peut désigner les deux côtés : dans son acception en philosophie il est du côté utilité, fonction, mais en IHM, l'usage est bien la pragmatique matérielle du couplage qui réunit les structures et fonctionnements hétérogènes que sont l'utilisateur et le système technique et qui est analysée sous toutes les coutures à travers les activités de conception et d'évaluation. Comme le souligne Beaudouin-Lafon, ce qui est conçu ce n'est pas l'interface (côté machine), mais l'interaction [BL04], non pas au sens fonctionnel, mais au sens d'un phénomène humain-technique qui n'a sans doute pas la "forme" d'un objet, mais qui relève bien d'un ensemble de matérialités, de réifications, de relations imbriquées et complexes qui en font bien un objet d'expérimentation, d'analyse et de savoir (section 2.3), et donc d'une *techno-logie* de l'interaction technique, comme science de l'interaction technique.

2.7 La philosophie de Simondon pour l'interaction ?

Les éléments de réflexion abordés jusqu'ici sont tout d'abord, après un point sur les manières dont la communauté IHM considère son objet, l'interaction, des propositions sur un "au-delà" de l'interaction en termes de configuration de relations denses [Tay15] et de médiations co-déterminantes [Ver05] entre humains et non-humains, et entre humain et monde. La description de cette approche pragmatique, qui veut intégrer la complexité du réel, a été poursuivie par une interrogation sur la matérialité de l'interaction, qui a amené à considérer à la fois la matérialité de l'interaction [Wib17], la matérialité numérique [WSR15], la matérialité de l'usage [JS12], et la place matérialité dans le design en général [JS12][Wib17]. En utilisant la théorie de l'hylémorphisme [Ari00], nous avons tenté de mieux situer les uns par rapport aux autres les concepts à l'œuvre dans ces réflexions. On a donc vu que les phénomènes d'interaction humain-machine gagnent peut-être à être pensés dans le cadre d'une co-constitution voire d'une co-conception complexe.

Les concepts dont nous avons besoin à partir de maintenant sont donc des concepts qui permettent de décrire à la fois le phénomène d'interaction ou de relation et le phénomène de conception pour comprendre ce qui les rassemble, et nous utiliserons ces concepts tels qu'ils sont formulés par Gilbert Simondon, qui est un penseur de l'interaction. Parmi ces concepts, il y en a qui concernent une ontologie, d'autres qui concernent l'interaction humain-machine. Dans la première catégorie (section 2.7.1), il y a d'abord le concept de l'être en relation : pour Simondon, toute réalité est relationnelle. Le concept d'individuation permet ensuite de décrire comment des individus se constituent par des relations qui se tissent préalablement à leur existence. La transduction est le principe général qui permet l'individuation, c'est une opération de structuration et de prise de forme : notre hypothèse sera que l'interaction est transductive. Puisque nous nous sommes posés la question de la prise de forme dans le cadre du design, j'exposerai ensuite la critique de l'hylémorphisme proposée par Simondon, qui démontre bien comment la dualité forme et matière peut être repensée à travers la transduction et l'individuation. Dans la seconde catégorie (section 2.7.3), j'aborderai essentiellement la techno-esthétique qui décrit l'idée d'une relation forte, active et ancrée physiquement entre humains et objets artificiels, et qui aborde aussi la dimension physique de l'action vis-à-vis des objets techniques. Le lien entre

la philosophie de Simondon et la conception (mis à part l'hylémorphisme) sera exposées dans le chapitre consacré à ce sujet (chapitre 6).

2.7.1 Réalité relationnelle transductive et individuation

Réalité relationnelle et individuation Décrire toute réalité comme relationnelle n'était pas nouveau, Spinoza, Nietzsche Bergson et Tarde l'avait également théorisé, mais Simondon systématise cette proposition : « l'être est relation ». Comme l'explique Didier Debaise [Deb04b]¹¹, avec cette proposition centrale, il ne s'agit plus de demander « quelles sont les conditions pour que deux individus donnés puissent être en relation », mais « comment des individus se constituent-ils par les relations qui se tissent préalablement à leur existence ? », question qui fait écho à celle de Don Ihde sur la médiation co-constitutive [Ihd90] (section 2.4.1). Pour Simondon, la réalité relationnelle est à tous les niveaux : ainsi, la sensation est une individuation physico-biologique, la perception est une individuation biopsychique et la connaissance est une individuation psycho-sociale ou transindividuelle. Mais dans un telle ontologie relationnelle, comment penser la genèse des êtres individuels et les régimes d'individuation qui s'opèrent [Sim05] ? Cette compréhension, qui suppose une remise en question du paradigme de l'être individuel où le réel est constitué d'une multiplicité d'individus stables, invariants et autonomes, nécessite de construire une pensée de l'individuation qui soit en même temps une pensée relationnelle, mais ce, à partir d'"un plan plus large". Ce plan plus large qui permet de décrire non pas des individus mais des régimes d'individuation est celui d'une nature "pré-individuelle", inspirée de la phusis grecque, comme première phase de l'être. Il ne s'agit pas de la nature telle qu'on la conçoit par exemple comme contraire à l'humain ou comme quelque chose que nous devrions retrouver, mais comme pure construction [Deb04b].

Métastabilité Comme le résume bien Debaise [Deb04a], dans la mesure où la réalité première est celle des « régimes d'individuation », il faut substituer à la stabilité des notions telles que « potentiels », « tensions », « instabilité », etc., qui visent à mettre en évidence les possibilités de transformation inhérentes à chaque élément du réel, à chaque singularité individuelle, qui « peut être la pierre qui amorce la dune, le gravier qui est le germe d'une

11. auteur auquel je renvoie pour une description plus complète mais accessible

île dans un fleuve charriant des alluvions ». L'être ne se réduit pas à ce qu'il est ; il est accumulé en lui-même, potentialisé [...] ; il est à la fois structure et énergie [Sim05].

Transduction Le concept de transduction est intimement lié à celui d'équilibre métastable. « Tout se passe comme si l'équilibre métastable ne pouvait être rompu que par l'apport local d'une singularité [...] capable de rompre cet équilibre métastable ; une fois amorcée, la transformation se propage, car l'action qui s'est exercée au début entre le germe [...] et le corps métastable s'exerce ensuite de proche en proche entre les parties déjà transformées et les parties non encore transformées ». La transduction, élément central de la philosophie de Simondon, se définit comme « une opération physique, biologique, mentale, sociale, par laquelle une activité se propage de proche en proche à l'intérieur d'un domaine, en fondant cette propagation sur une structuration du domaine opérée de place en place : chaque région de structure constituée sert à la suivante de principe de constitution, si bien qu'une modification s'étend ainsi progressivement en même temps que cette opération structurante. ». Cette propagation suppose une mise en communication d'échelles disparates (microphysique et macrophysique). En ce sens, « l'individuation est une opération de structuration amplifiante qui fait passer à un niveau macrophysique les propriétés actives de la discontinuité primitivement microphysique » [Sim05]. Il arrive à Simondon d'opposer la transduction à la dialectique avec laquelle elle partage une même ambition de description du réel comme mouvement et transformation. Le reproche principal de Simondon envers la dialectique est qu'elle fait du négatif une « seconde étape ». Or, dans la transduction, le négatif est simplement lié à l'incompatibilité, à la « non-stabilité » des éléments en équilibre « métastable » [Deb04a].

Si Simondon est un penseur de l'interaction, c'est donc comme "communication interactive", pour montrer que la solution apportée à la disparation de deux ordres de grandeur n'est pas une unité stable, fermée et fixe, mais une relation dynamique et complémentaire.

2.7.2 Critique de l'hylémorphisme

La question centrale que se pose Simondon dans sa thèse principale "L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information"¹² [Sim05] est de résoudre le problème de l'individuation et il reconnaît la "force logique du schème hylémorphique d'Aristote" pour penser non seulement la fabrication technologique 2.5.4 "mais aussi un grand nombre de faits de formation, de genèse, et de composition, dans le monde vivant et le domaine psychique" [Sim05] (p 39). Mais puisque ce schème se base sur une opération technologique, Simondon se propose de le décortiquer pour voir si les concepts de forme et de matière représentent bien le dynamisme de l'opération. L'opération technique analysée est celle du moulage de la brique, où l'argile constituerait la matière et le moule la forme que l'on veut imposer à cette matière. Or Simondon déconstruit ce schéma en montrant à quel point le moule est loin d'être une forme sans matière, et l'argile une matière sans forme. En fait, l'argile n'est pas informée de l'extérieur par le moule : elle est un potentiel de déformations, elle recèle de l'intérieur une propriété positive qui lui permet d'être déformée, de sorte que le moule agisse comme limite imposée à ces déformations : c'est parce que l'argile possède des propriétés colloïdales qui la rendent capable de conduire une énergie déformante tout en maintenant la cohérence de ses chaînes moléculaires, parce qu'elle est en un sens « déjà en forme » dans le marais, qu'elle peut finalement être transformée en brique [Com99]. La forme n'est pas le seul fait d'être parallélépipédique, elle est aussi pour l'argile d'être sans fissure et sans bulles d'air. La matérialité du moule est également déterminante : l'art de construire des moules est un aspect délicat de la fonderie, et le moule doit également, il doit être préparé, avec un revêtement bien défini, un saupoudrage pour pouvoir l'ouvrir et le fermer sans endommager le contenu. La description détaillée de l'opération fait d'ailleurs plusieurs pages dans l'ouvrage. Ainsi l'hylémorphisme, en ne voyant dans le moulage que l'application d'une forme à une matière, ne retient d'un processus que ses termes extrêmes (précisément : la forme et la matière), occultant le point central, à savoir l'opération de prise de forme elle-même, la médiation qui s'opère dans les deux demi-chaînes techniques et qui repose sur un échange énergétique où la matière est ce qui véhicule l'énergie et la forme ce qui la régule. Car pour que le moule puisse limiter l'expansion de la terre plastique et diriger statiquement cette expansion, il faut que les parois du moule développent

12. "Du mode d'existence des objets techniques" n'étant que sa thèse secondaire [Sim58]

une force de réaction égale à la poussée de la terre.

C'est le système énergétique qui est individuant. Dereclenne [Der14], dans un article constatant qu'aucune ontogenèse susceptible de rendre compte du caractère essentiel et génétique du vivant n'a sa place dans le projet phénoménologique de Merleau-Ponty, malgré sa volonté de décrire une forme spécifiquement vitale de structuration, décrit la pensée de Simondon comme une tentative de construire le phénomène à travers une réflexion sur la matière, réflexion qui intègre, à l'instar de Bachelard, *l'énergie* comme concept central [Bac53] :

C'est-à-dire que l'énergie désigne ce par quoi la matière vit et existe, ce par quoi l'être qu'elle constitue se structure. « L'être est, il faut dire : l'énergie est. Elle est absolument ». Elle est « le nœud de l'activité matérielle »

Tout un travail d'analyse serait ainsi à mener pour comprendre l'opération de prise de forme dans le design, et tenter d'appliquer l'analyse de Simondon à l'analyse de la prise de forme par les designers (section 2.5). Comme le souligne Hatchuel, les objets techniques, et c'est encore plus vrai pour les objets numériques interactifs, présentent un nombre indéfini et ouvert de combinaisons entre forme et matière [Hat16]. On peut partir de l'hypothèse que la "matière" y est constituée des éléments divers à composer, les "digital materials", ceux qui portent la possibilité de prise de forme en eux, sans oublier l'énergie mise en œuvre dans cette prise de forme. De même, la "forme" y serait le concept directeur de l'objet à concevoir, la vision, qui régule cette prise de forme et l'énergie y est un jeu complexe et étalé dans le temps du processus de conception des contraintes technologiques, des trouvailles des ingénieurs, des désirs des designers, des besoins de formation des stagiaires, et des besoins des utilisateurs. Mais, comme le prédit la critique de Simondon, cette distinction est simplificatrice voire inexacte. En effet, une autre manière de détailler la complexité de ce processus est de citer les multiples frontières entre le "quoi" et le "comment" qui auraient pour rôles respectifs la forme et la matière : mais cette différence est souvent inapplicable en conception d'interaction, car la spécification (le quoi) n'est souvent possible à définir qu'en programmant (une machine à états par exemple) [Cha12]. Finalement, on peut aussi mettre une frontière entre ce qui a déjà été décidé (devenu la forme), et ce qui reste à décider (qui reste la matière).

La théorisation de la prise de forme (design form-making) proposé dans Jung et al 2017 [JWWS17] rend très bien compte de ce type de complexité.

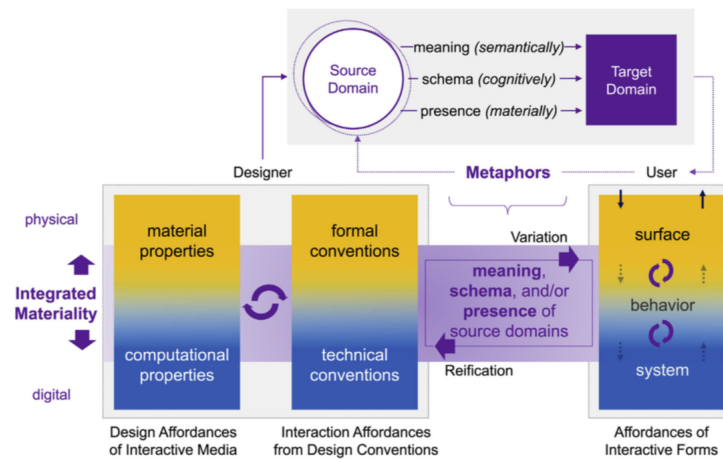


FIGURE 2.8 – Métaphores, matérialités et affordances dans la conception d’artefacts interactifs [JWWS17].

Pour repenser les affordances dans le cadre des media interactifs à matérialité hybride (écrans, interaction et intelligence ambiante, interaction tangible...), l’article propose de repenser le rôle des métaphores au-delà de la ressemblance représentative avec des objets physiques. Pour ce faire, mais sans se référer à une problématique de type hylémorphique, le processus de prise de forme, avec les contraintes, les ”design affordances” des éléments disponibles, est conceptualisé à travers la prise en compte trois constituants formels : la surface, le comportement et le niveau d’organisation systémique :

The surface aspect gives an application its material presence and indicates interaction cues ; the behavioral aspect guides interaction flows through the chain of interaction triggers and responses ; and the systemic aspect connects multiple formal elements into a coherent structure.

Ce processus est décrit comme une réindividuation itérée faisant jouer alternativement aux éléments le rôle de forme et de matière d’une manière qui est proche d’une analyse simondonienne. La ”forme interactive” à concevoir est décrite comme une modulation de possibilités et de contraintes définies par des matérialités numériques, mais aussi d’autres formes (e.g, styles, patterns, conventions existantes), ce qui est une façon de prendre en compte les aspects formels des matériaux constitutifs, de manière analogue aux pro-

priétés colloïdales de l'argile, et les aspects matériels des formes, comme les subtilités de fabrication du moule de terre (fig. 2.8) :

1. les propriétés matérielles et numériques combinées d'un medium donnent lieu à des "design affordances" qui définissent des possibilités et les contraintes ;
2. les conventions de design diverses (e.g ressources sémiotiques, styles d'interaction, design patterns) informent les possibilités d'interaction (en fonction de l'expérience des utilisateurs) ;
3. une fois conçue et utilisée, les variations d'une nouvelle "forme interactive" sont réinstanciées, se réifiant comme forme et nouvelle convention

Nous ébaucherons ce type d'analyse à travers des exemples dans ce manuscrit (chapitre 6).

2.7.3 L'interaction humain-machine dans la techno-esthétique

Simondon a fondé un des premiers laboratoires d'IHM en 1965, mais la communauté IHM (française ou étrangère) l'ignore¹³, et le domaine de l'IHM n'existait peut-être pas encore. Il s'agissait plus précisément d'un laboratoire de psychologie générale et de technologie, dont l'objectif était d'étudier les rapports en humains et technologie¹⁴. De fait, de nombreuses questions liées à l'interaction humain-machine parcourent l'œuvre de Simondon, comme le montre Carrozzini [Car16b] en démontrant la parenté entre la pensée de Norman et les concepts de Simondon. Ainsi, la deuxième partie du MEOT, son ouvrage le plus célèbre [Sim58], s'intitule : "L'homme et l'objet technique".

Le concept de techno-esthétique est un concept proposé tardivement [Sim14d]. Il décrit l'idée d'une relation forte, active et ancrée physiquement entre humains et objets artificiels. Nous pouvons identifier trois caractéristiques de ce concept intéressantes pour l'IHM : la notion d'un conti-

13. du moins si on se réfère à la liste présente sur le site de l'AFIHM (Association Francophone d'Interaction Humain-Machine, www.afihm.fr) - à l'exception du laboratoire Tech-CICO de l'UTT et du laboratoire Costech de l'UTC qui lui n'est pas sur la page de l'AFIHM

14. Certaines des premières thèses d'ergonomie y ont été soutenues, dont une en contrôle arien : "Charge de travail et variations des modes opératoires" par Jean-Claude Sperandio ; sous la direction de Gilbert Simondon [Spé72]

num qui relie l'opérateur et le sensible, l'idée d'une communauté de schèmes entre humains et objets techniques, et la description d'une nature dynamique de l'interaction que Simondon qualifie de métastable.

Un «spectre continu» qui relie la technique et l'esthétique. Binda [Bin15] souligne l'idée simondonienne, mais que l'on trouve aussi chez l'anthropologue Leroi-Gourhan [LG65], que le corps humain a toujours été connecté à des prolongements techniques par lesquels la sensibilité de l'individu se réorganise, tout en réorganisant ce qui l'entoure. Mais avec la techno-esthétique, ce n'est pas seulement un lien fort entre humain et technique que décrit Simondon, mais l'idée d'un «spectre continu» qui relie la technique et l'esthétique, l'opérateur et le sensible [Duh10], ou encore, comme l'écrit Loeve [Loe16], le fait que la pure activité d'appréciation de l'allure d'une chose (sentiment esthétique) et la pure activité de maniement d'un outil (dimension opératoire) sont les extrêmes d'un spectre continu de sensorialité techno-esthétique. Dans les termes propres de Simondon : «Le sentiment techno-esthétique semble être une catégorie plus primitive que le sentiment esthétique seul ou l'aspect technique considéré sous l'angle de la seule fonctionnalité, qui est appauvrissante.» [Sim14d].

Dimension physique de l'action technique C'est également dans le cadre de ce concept techno-esthétique que Simondon évoque la dimension physique de l'action vis-à-vis des objets techniques, et les sensations qui y sont associées, en tant qu'action : « la techno-esthétique n'a pas pour catégorie principale la contemplation. C'est dans l'usage, dans l'action, qu'elle devient en quelque sorte orgasmique, moyen tactile et moteur de stimulation. Quand un écrou bloqué se débloque, on éprouve un plaisir moteur, une certaine joie instrumentalisée, une communication, médiatisée par l'outil, avec la chose sur laquelle il opère. C'est un type d'intuition perceptivo-motrice et sensorielle. Le corps de l'opérateur donne et reçoit. » [Sim14e] (p 383). Pour Simondon la relation techno-esthétique s'éprouve ainsi « dans l'action même du corps du musicien, dans la relation qui l'unit à l'instrument : la posture de son corps, la flexion de ses membres, le rythme de ses enchaînements, sont ainsi autant conditionnés par l'instrument, dans son fonctionnement propre, dans sa facture et son organisation, que par la notation et les consignes de jeu de la partition. Il y aurait donc toute une organologie à constituer dans la perspective d'une techno-esthétique où le corps serait lui

aussi un instrument, au sens où le corps est lui-même un organisme techno-esthétique.» [Duh16b]. C'est enfin à travers une réflexion sur la dimension gestuelle de l'action comme transduction que la techno-esthétique trouve un sens particulier. « La centralité du geste, largement théorisée par Simondon dans ses cours sur les techniques et leurs réalisations objectives, repose sur la catégorie fondamentale d'opérativité, qui possède aussi un rôle significatif dans ses réflexions sur l'esthétique et la techno-esthétique. Cependant, si dans le cas de l'œuvre d'art le geste du créateur constitue l'empreinte d'un style, qui reste endogène à l'œuvre, dans le cas de la techno-esthétique et des objets évaluables par l'emploi de cette catégorie le geste se fait germe structural d'un processus transductif qui, en engendrant une nouvelle typologie spécifique d'expérience, donne, surtout à son utilisateur, accès à un véritable plaisir d'action. » [Car11].

Communauté de schèmes entre humains et objets techniques et prégnation. Mais ce continuum dans la relation entre l'humain et la technique que nous venons de décrire repose chez Simondon sur l'idée d'une communauté et d'une relation d'analogie entre l'humain et l'objet technique. Il ne s'agit pas là de l'idée cybernétique de l'humain-machine dont Simondon est très éloigné, et qu'il critiquait vivement, mais d'une idée de modes de fonctionnement originaires communs entre des schèmes psychophysiologiques et des schèmes de fonctionnement des objets techniques. Nous en parlerons plus précisément dans la section sur transduction et conception (chapitre 6 section 6.3.2), car c'est au niveau de l'invention et de l'imagination de l'ingénieur que Simondon analyse le plus précisément cette analogie, mais une première manifestation en est aussi le phénomène de prégnation [Sim14c], ne relevant d'une connaissance ni inductive, ni conceptuelle, et se manifestant par exemple dans le jeu de l'enfant : « le jeune enfant, dans la situation de prégnation, ne voit pas et n'entend pas seulement une automobile : il est automobile ou camion, il fait lui-même le bruit du moteur, et par participation, il est le moteur ». Simondon parle d'« a-dualisme primitif » dans ces situations, où « les schèmes de fonctionnement techniques sont joués par l'organisme vivant » », et où « l'objet et le sujet font partie d'une même unité dynamique de situation, ils ont le même devenir, le même destin momentané : ils forment une unité fonctionnelle et l'équivalent d'une totalité organique ». La prégnation repose ainsi sur des modes communs, et c'est sur cette analogie des schèmes que repose la notion de « mentalité technique » qui

résulte selon son analyse à la fois dans la pensée philosophique et dans la mise en œuvre des machines en une possible « mise en œuvre d'un transfert sans perte », mécanique ou logique [Sim14a]. C'est sur également l'idée d'un code commun que repose enfin selon Simondon la possibilité d'un couplage humain-machine, nous suggérant ainsi une question de recherche intéressante pour l'IHM : « Le couplage de l'homme à la machine commence à exister à partir du moment où un codage commun aux deux mémoires peut-être découvert, afin que l'on puisse réaliser une convertibilité partielle de l'une à l'autre, pour qu'une synergie soit possible » [Sim58]. C'est en effet la réponse qu'imagine Simondon à la fois à l'idée de « Human engineering » [Lep53] et à la cybernétique [Sim58]. Plus exactement : « Ces recherches risquent de rester peu efficaces si elles ne vont pas au fondement même de la communication entre l'homme et la machine. Pour qu'une information puisse être échangée, il faut que l'homme possède en lui une culture technique, c'est-à-dire un ensemble de formes qui, rencontrant les formes apportées par la machine, pourront susciter une signification. » [Sim58] (p 252).

Marge d'indétermination, ajustement, découplage. Selon Simondon l'individuation, qui désigne tout avènement de quelque chose, se caractérise de manière essentielle par des conditions de déclenchement particulières que Simondon emprunte à la thermodynamique : elle résulte de l'état de métastabilité d'un système en équilibre, recelant des potentiels relevant de dimensions hétérogènes. La transduction exprime le sens processuel de cette individuation [Com99]. C'est l'idée de l'interaction comme résolvant une incompatibilité, comme issue d'un équilibre métastable, mais aussi comme mise en œuvre d'un potentiel au sein de cette discontinuité. Comme l'explique [Mac02] : « For the process of transduction to occur, there must be some disparity, discontinuity or mismatch within a domain ; two different forms or potentials whose disparity can be modulated. Transduction is a process whereby a disparity or difference is topologically and temporally restructured across some interface. It mediates different organizations of energy. The membranes of the microphone move in a magnetic field. A microphone couples soundwaves and electrical currents. » En terme technique, cette opération se caractérise notamment par la présence d'une marge d'indétermination [Mac02], et si la métastabilité est un potentiel, c'est parce qu'elle permet une adaptation : « ITI's operate with a level of indeterminacy which enables them to adapt to their environment. » [Mil11] (ITI : inven-

ted technical individual). Cet ajustement au passage d'un échange, d'une interaction, cette marge d'indétermination, est une expression qui désigne selon Hui [Hui16] d'abord la capacité d'un système à accepter du bruit, de l'imprévu, ensuite l'ouverture d'un système à l'interaction et enfin la transduction. En tant que praticiens de l'IHM, nous pouvons bien sûr voir dans ce métastable et cet indéterminé le décalage entre un système technique et des humains, ou entre modèle de l'utilisateur et modèle du système, ou encore le fossé d'exécution de Norman. Si modes commun de fonctionnement il y a, en principe du moins, il faut en effet encore « que les hommes, dans leur rapport à la machine, s'expriment selon des systèmes d'information qui sont aisément traduisibles, avec le codage de la machine, en un ensemble de signaux qui ont un sens pour la machine (c'est-à-dire qui correspondent à un fonctionnement déterminé.) » [Sim58]. Biopoiesis [Fox15] est par exemple une installation jouant explicitement sur l'individuation transductive au sein d'un système métastable, composé de processus réactifs à des solutions chimiques, des capteurs et des algorithmes, autant de milieux de dimensions hétérogènes : « Mediation across these different domains, the structuring of energy from sound and motion into electricity and crystals is transduction, one of Simondon's core concepts : transduction. »

Relation techno-esthétique et affordances. La relation techno-esthétique serait ainsi une relation originaire et transductive entre l'humain et le monde, qui n'est pas sans rappeler le concept d'affordances de Gibson puisqu'il s'agit d'une relation dynamique primaire d'orientation entre humain et environnement fortement associée à la fois à une capacité de l'environnement et à une capacité humaine, et ce même si Simondon privilégiait la notion de milieu à celle d'environnement [Gib86]. Dans un article analysant la théorie simondonienne de l'information comme empruntant à la fois à la cybernétique et à l'écologie avec l'idée d'information soit comme redondance, soit comme résonance, c'est bien à l'information gibsonienne comme un accordage qu'il compare l'information chez Simondon : « Dans cette approche, l'information a ainsi pour contenu une opération d'accordage ou, selon les mots de Gibson, de mise à l'unisson » [Aur02].

2.7.4 Le mode d'existence des objets techniques

L'objet technique est "ce dont il y a genèse". Il n'est pas une chose mais l'aboutissement temporaire d'une lignée technique qui s'individue par la

concrétisation d'un fonctionnement. La concrétisation est un «processus» par lequel les objets techniques progressent de manière analogue¹⁵ aux êtres vivants [Sim05], qui seuls cependant sont «concrets dès le début » [Sim58], p 49. Comme le résume Barthelemy [Bar15], la concrétisation des objets techniques possède plusieurs aspects, selon que l'on aborde le niveau des éléments, celui des individus ou celui des ensembles. Au niveau des éléments, deux aspects sont dégagés par Simondon. C'est d'abord l'augmentation de la «résonance interne» entre les éléments qui composent l'objet correspondant à l'idée d'une organicité croissante, par laquelle chaque pièce «ne peut pas être autre qu'elle n'est» [Sim58], p 21. La concrétisation c'est le fait qu'un élément d'un objet devienne pluri-fonctionnel à travers une genèse par causalité récurrente au lieu d'avoir une seule fonction. Simondon développe l'exemple des ailettes de refroidissement dans le moteur thermique à combustion interne qui servent à la fois à augmenter la surface de refroidissement et à consolider la structure [Sim58], pp 22-23. Hatchuel [Hat16] propose une explication de ce qui fait la différence entre la logique des choses et la logique des objets techniques, qui justifie la nécessité d'un langage pour les représenter (et par là mieux les gérer). Les objets techniques se différencient en effet des choses par leur définition, leur forme (cf ci-dessus 2.7.2), et leur causalité. Leur définition en compréhension est leur fonction, mais leur définition en extension est leur fonctionnement, et leur causalité, de l'ordre de la convergence, de la synergie et de l'auto-corrélation, est spécifique.

L'analyse du mode d'existence des objets numériques a commencé dans le domaine de la programmation et du logiciel [Kur16] [Hui16] [Duh13] [Gro16b]. Les patrons de conception logiciels, et surtout leurs implémentations dans des bibliothèques [Fer19], seraient un bon candidat pour une telle analyse, notamment parce qu'ils décrivent des structures établies et améliorées au cours du temps d'éléments logiciels avec leur liens de parenté, leurs dépendances, leur synergie et leur plurifonctionnalité [GHJV95][Bor00][BT01]. C'est le cas également des "framing constructs" de Zimmermann qui sont construits à partir de patterns récurrents, qui fonctionnent comme des perspectives spécifiques que les concepteurs peuvent adopter lorsqu'ils appliquent une théorie (comme par exemple celle de l'attachement à un produit). [Zim09]. Chez les programmeurs, la concrétisation correspond à ce qui est parfois qualifié d'"élégance" [Gro16a]. Le mémoire

15. bien que de manière discontinue, et avec des éléments détachables, car produits plutôt que engendrés

de Ferrarato [Fer19] propose une étude simondonienne d'un navigateur web, choisi pour sa haute technicité, son caractère nodal, et sa marge d'indétermination (terme utilisé par Simondon pour désigner les machines interactives), appliquant la méthode inductive préconisée par Simondon. Elle pose notamment la question de l'applicabilité de Simondon à un objet a priori *immatériel*. Ce qui donnerait selon l'auteur une "existence" au code informatique est justement l'interface : écran graphique, périphériques, etc. mais son hypothèse est surtout qu'il y a transduction du processus de concrétisation d'un régime d'existence (matériel) à un autre (immatériel) via le code informatique, et que la couche de technicité immatérielle qui se superpose à la première est rendue possible par la machine à marge d'indétermination qu'est l'ordinateur, qui se manifeste à travers les possibilités d'évolution technique dans l'open source (voir section 7.3.5 chapitre 7).

L'IHM regorge de concrétisations d'éléments et d'objets techniques individuels dont les schèmes seraient à décrire de manière unifiée. Ces schèmes sont présents dans la littérature, dans les cours, dans les schémas des ingénieurs et des chercheurs. Les ingrédients disponibles pour commencer, par induction¹⁶, une science systématique des opérations techniques interactives pourraient venir des schémas de techniques d'interaction et de morphologies hybrides [JWWS17], des modèles d'architecture, mais aussi plus indirectement des analyses descriptives existantes, par exemple des tâches d'interaction, des modalités en entrée et en sortie, des paradigmes (conversationnel, menus textuels, formulaires, manipulation directe, post-WIMP, ...), des métaphores. Une science pourrait prendre la forme d'une description qui inclut les différents ordres de grandeur de ces phénomènes, et la manière dont ils se transduisent. Le musée de l'interaction de l'INRIA¹⁷ est un recensement qui propose une première classification de ces techniques, tout comme la classification cladistique des objets interactifs tangibles proposée par Fleck et al [FRHC18]. Pourquoi une telle "science des opérations techniques interactives" est-elle nécessaire? Ne suffit-il pas d'avoir des modèles de l'interaction? Le modèle de l'interaction instrumentale [BL00], qui permet de préciser pour un instrument ses degrés d'indirection, d'intégration et de compatibilité, fournit une formalisation de ce que serait la concrétisation pour un interacteur. C'est une mesure statique, mais on pourrait imaginer

16. Comme le souligne Ferrarato, la méthode simondonienne est un acte extra-langagier, un geste retranscrit [Fer19]

17. <https://hci-museum.lri.fr/>

l'utiliser pour mesurer le degré de concrétisation d'un objet évoluant dans une lignée technique. Ce modèle est un exemple de schème, mais il y en aurait probablement d'autres dont la genèse démontrerait la concrétisation, comme la liaison (binding) [MCC⁺18] un schème qui unifie plusieurs formes d'interaction. Dans le chapitre 7, je présente une piste récente sur un autre exemple de schème qui pourrait contribuer théoriquement à cette sciences des opérations techniques interactives.

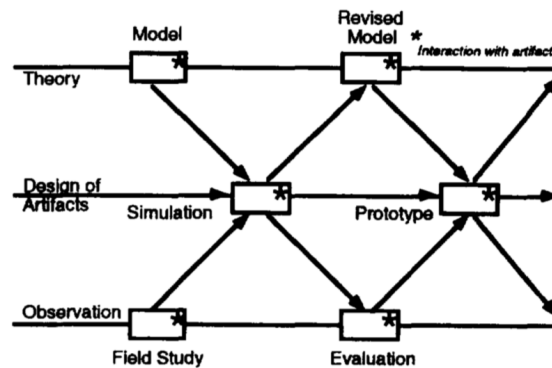


FIGURE 2.9 – HCI creates and examines the interaction of people with artificially-created artifacts, moving between theory and empirical observation [MF97].

Si une science plus systématique des opérations techniques interactives est nécessaire, c'est parce que les théories considérées en IHM s'intéressent rarement à l'ordinateur (voir section 2.2). La vision proposée par Mackay & Fayard [MF97] fournit une hypothèse sur cette absence :

Why don't we simply consider HCI to be a natural science and select particular methods as needed? The problem is that we are interested in artifacts made by people and the design process is quite different from the scientific method. [...] The major difficulty for HCI is that the object of study is not an independent natural phenomenon, as in all of the sciences.

L'article détaille plusieurs configurations des rapports entre théorie, design et observation de terrain (fig. 2.9). La théorie porte sur différents aspects : des modèles descriptifs d'une réalité (les rythmes de sommeil des contrôleurs

aériens, rôle des strips papier dans la sécurité), des modèles cognitifs, des hypothèses scientifiques ; elle modélise parfois les interactions avec un système, mais elle ne modélise jamais en effet le système lui-même, le prototype. Nous considérons effectivement les prototypes comme une réalité à part, une "réalité étrangère" [Sim58], avec sa propre dimension (la ligne qui lui est réservée dans le schéma de la fig. 2.9), parce que non indépendante, fabriquée par l'humain, et de ce fait *quasi-connue*, alors même que le risque est d'en *ignorer* la matérialité effective [WSR15].

2.7.5 Interaction et conception (1) : l'interaction individuelle

L'interaction chez Simondon, qu'il s'agisse par exemple de communication ou d'usage d'outil, ne va pas sans individuation. Comme le souligne [Bin15], c'est la relation même qui joue un rôle de co-constitution entre individu et milieu. L'individuation s'effectue déjà comme information, au sens de prise de forme, dans l'interaction avec des données, et dans les associations d'idées ou les mises en relation qui peuvent s'opérer. Mais surtout, comme l'exprime Simondon [Sim05] p 31, l'information « suppose tension d'un système d'être ; elle ne peut être qu'inhérente à une problématique ; l'information est ce par quoi l'incompatibilité du système non résolu devient dimension organisatrice dans la résolution. ». J'ai pu observer un tel phénomène de prise de forme au cours d'une série d'ateliers participatifs avec des scientifiques, circulant entre trois pôles : celui des hypothèses scientifiques, celui du medium computationnel, et celui de la conception participative [LM04]. Des transductions, des transferts de structure¹⁸ s'opèrent d'un pôle de responsabilités à l'autre, entre modèles algorithmiques et hypothèses expérimentales, ou entre activités d'atelier (idéation, prototypes) et hypothèses scientifiques, opérant des résolutions de tensions dans un système d'engagements pluri-disciplinaires problématiques. Une prise de forme donnant lieu à une individuation se produit également lorsque l'interaction devient réflexive, grâce aux traces ou aux mécanismes d'annotation, comme on le verra dans le chapitre 3 (section 3.3).

L'expérience esthétique fournit probablement un modèle de compréhension de cette notion d'expérience utilisateur très utilisée au-

18. Avec le pragmatisme de Dewey, mis en perspective par Dalsgaard par rapport aux pratiques des designers, on retrouve cette notion de structures transitoires émergeant dans l'interaction et formant des stabilités temporaires [Dal14].

jourd'hui en IHM comme objet d'intérêt scientifique. Simondon [Sim58] (p 191) affirme de l'expérience esthétique : « ce n'est jamais à proprement parler l'objet qui est beau : c'est la rencontre s'opérant à propos de l'objet entre un aspect réel du monde et un geste humain », et l'objet esthétique, mixte, « contient, pour satisfaire ce geste et lui correspondre, un élément de réalité qui est le support de ce geste. ». En fait l'objet esthétique « n'est pas à proprement parler un objet ; il est aussi partiellement le dépositaire d'un certain nombre de caractères d'appel qui sont de la réalité sujet, du geste, attendant la réalité objective en laquelle ce geste peut s'exercer et s'accomplir ». C'est ainsi cette mixité qu'on observe dans l'expérience utilisateur, qui, comme phénomène interactif, s'individue en objet de réflexion pour un concepteur, à travers diverses réifications sous forme notamment d'enregistrements vidéo. A l'instar de l'expérience esthétique, l'expérience utilisateur comporte une forme de durabilité : « S'il y a de l'expérience esthétique, c'est parce que quelque chose soudain se détache sur l'espace ou dans le temps, surgit du fond et s'impose. Ensuite l'homme (ou un groupe d'hommes) pourra, soit laisser le moment esthétique se perdre dans l'impression fugitive, soit l'élaborer, le rendre durable, communicable, lui donner consistance dans des objets ou des marques symboliques, en l'inscrivant dans une construction plus large. » [MC12].

L'interaction peut également donner lieu à une production concrète d'un objet technique. Sur le plan technique, le modèle de référence de l'interaction semble être chez Simondon celui de l'inventeur, qu'il retrouve au sein de l'utilisateur. Ainsi, concernant l'activité de réglage, qui est « celle qui prolonge le plus naturellement la fonction d'invention et de construction : le réglage est une invention perpétuée, quoique limitée. La machine, en effet, n'est pas jetée une fois pour toutes dans l'existence à partir de sa construction, sans nécessité de retouches, de réparations, de réglages » [Sim58] pp 250-251. Les activités de personnalisation [Mac91] font partie de ce type d'individuation. La programmation dans l'interface [Let01b] [Let05], ou sur exemple [Gir00] ou démonstration [Cyp93] [Lie00] repose sur l'idée que l'utilisation vaut comme conception ou programme, et qu'une transduction peut s'opérer d'un niveau à l'autre, du moment que l'on peut nommer les éléments de l'interaction, de manière analogue au scénario d'écriture augmentée.

L'interaction est enfin idéalement individuanante lorsqu'elle correspond à une activité d'organisation et de coordination technique. Ce rôle, celui de l'ingénieur d'organisation, intervient très tôt dans le MEOT, comme le souligne [Hat16]. Il est cette « conscience responsable et inventive » de l'être hu-

main vivant « parmi les machines qui opèrent avec lui », cité par également par [Duh13]. Ce rôle, que Simondon explicite à travers la métaphore du chef d'orchestre, décrit le rapport idéal de l'humain avec les machines [Sim58] :

Loin d'être le surveillant d'une troupe d'esclaves, l'homme est l'organisateur permanent d'une société d'objets techniques qui ont besoin de lui comme les musiciens ont besoin du chef d'orchestre. Le chef d'orchestre ne peut diriger les musiciens que parce qu'il joue comme eux, aussi intensément qu'eux tous, le morceau exécuté ; il les modère ou les presse, mais est aussi modéré et pressé par eux ; en fait, à travers lui, le groupe des musiciens modère et presse chacun d'eux, il est pour chacun la forme mouvante et actuelle du groupe en train d'exister ; il est l'interprète mutuel de tous par rapport à tous. Ainsi, l'homme a pour fonction d'être le coordinateur et l'inventeur permanent des machines qui sont autour de lui. Il est parmi les machines qui opèrent avec lui.

2.8 Résumé

Dans ce chapitre, j'ai souhaité faire le point sur la possibilité d'une contribution de l'IHM à la philosophie. Le chapitre a commencé par une description des profils des théories en l'IHM selon divers critères, tels que l'utilisation de théories externes, le fait de s'appuyer sur une théorie de l'interaction, la prise en compte d'une définition des machines, la proposition d'une axiologie, et la description théorique des processus de conception. Cette mise en perspective est suivie par un état de l'art des théories qui proposent de définir l'interaction, en partant du principe qu'elle constitue l'objet principal du domaine et qu'en élaborer une théorie semble nécessaire. Cet état de l'art a permis de souligner la présence de plusieurs définitions qu'on pourrait qualifier d'analogiques. Il est poursuivi par un état de l'art des approches qui tentent d'enrichir le concept d'interaction par une recherche sur les théories de la médiation ou par une conception de l'interaction dans la continuité de la co-évolution humain-technique. Avant d'arriver à l'exposé des concepts de transduction, d'individuation et de techno-esthétique de Simondon qui à mon sens seraient une proposition pertinente pour comprendre autant les

phénomènes d'interaction que de conception, une section sur la philosophie de la technique précise comment l'IHM pourrait y contribuer.

La suite de ce manuscrit aborde des concepts très différents tels que l'écriture interactive, l'interaction tangible, la conscience mutuelle dans la collaboration et la conception participative. Ce qui intervient dans ces thèmes est à chaque fois l'opération plus ou moins manifeste d'une interface [Hoo14], et l'émergence au sein de cette frontière de différentes formes d'individuation opérant par transduction. Dans chacune des descriptions des projets auxquels j'ai participé j'essaierai donc de préciser les mécanismes d'individuation à l'œuvre.

Avec cette vision de la technique et de l'interaction avec la technique, intégrée au progrès humain, et comme suggéré précédemment (section 2.2), j'espère pouvoir proposer la perspective d'une évolution technique où l'IHM pourrait jouer un rôle régulateur et créatif pour participer aux approches systémiques nécessaires pour contribuer, à son échelle, à faire face à la crise techno-climatique qui s'amplifie aujourd'hui.

Chapitre 3

Ecrire l'interaction

Pour commencer notre parcours pragmatique, ce chapitre expose des problématiques et des phénomènes autour de l'interaction écrite, liés aux questions de matérialité abordées dans le chapitre 2. Dans l'écriture, la matérialité c'est d'abord une "physicalité" immédiate du papier ou du geste ; puis, avec la persistance des signes écrits, c'est un phénomène d'individuation ; enfin, avec la spatialisation opérée par l'écriture, c'est l'oscillation entre médiation incarnée du geste écrit et médiation herméneutique avec les signes produits, d'autant qu'avec le dispositif du stylo numérique, qui est l'objet technique utilisé dans les exemples, ces signes constituent de vraies interfaces numériques.

Les projets mentionnés dans ce chapitre sont le projets Reactivity/graphenda [LM09] et Paperoles/Musink [LMD07][TLM09]. Ces projets impliquent l'utilisation du stylo numérique pour interagir et l'utilisation de l'écriture pour créer du contenu interactif. Le projet Strip'TIC qui utilise également le stylo numérique étant moins centré sur l'écriture, et se comprenant plutôt dans le cadre d'une problématique de physicalisation des surfaces, est abordé dans le chapitre 4.

Ce chapitre commence par une brève description des projets, suivi par quatre grandes sections, l'une consacrée au geste, la seconde à réflexivité, la troisième à la persistance et la quatrième à l'écriture comme opérateur de mise en relation. Le chapitre se termine par une analyse des médiations dans l'écriture. Ces sections reprennent en partie les deux articles associés à ces projets [LMD07] [LM09], mais la manière dont le chapitre est structuré se donne pour objectif d'en proposer une synthèse et de présenter de manière unifiée mes observations et réflexions sur l'écriture de l'interaction.

3.1 Les projets

Les projets sont brièvement présentés dans cette section, mais les contextes des projets et les méthodologies utilisées sont présentées dans le chapitre 6.

3.1.1 Ecriture et recherche en biologie

Les questions de recherche autour du stylo numérique qui ont été explorées avec les biologistes sont : les liens entre le papier et l'ordinateur pour les cahiers de laboratoire [MPL⁺02], et l'interaction écrite. Dans le cadre du projet Reactivity à l'INRIA, ces questions ont été explorées à travers deux prototypes : re-blog [LTM09] et graphenda [LM09].

re-blog

Le premier prototype conçu est un blog implémenté avec des extensions de Wordpress dont l'objectif est de relier un cahier numérique Livescribe et des documents numériques (articles, photos,...) (fig. 3.1, 3.8, 3.9, A.2 et A.4).

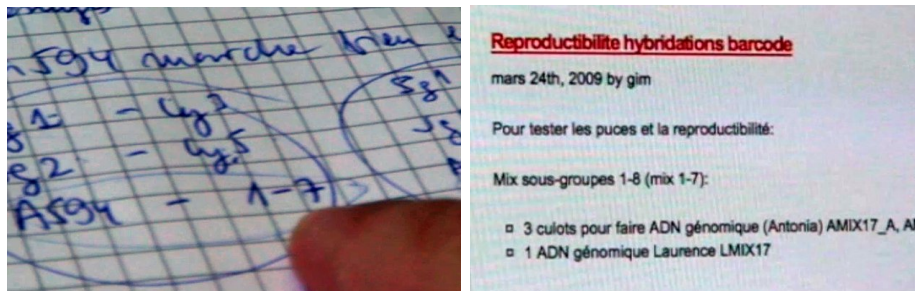


FIGURE 3.1 – Notations pour préparer une expérience a) sur le cahier, b) sur re-blog.

graphenda

Le second prototype développé, *graphenda*¹, a pour premier principe de permettre à l'utilisateur de consulter interactivement, avec le stylo

1. *agenda* signifie : choses à faire, *legenda* : choses à lire ; d'où *graphenda* : choses à écrire

numérique, des informations associées à des données graphiques imprimées (cartes, graphes, molécules en représentation 3D, etc...). Ces informations peuvent résulter de calculs simples programmés pour être exécutés sur le processeur du stylo qui s'affichent sur son mini-écran (fig. 3.2.b). Le deuxième principe de ce prototype permet à l'utilisateur de créer les zones interactives par tracé ou sélection. Le troisième principe est un "tableur" dont les lignes correspondent aux données de calcul et les colonnes aux fonctions de calcul programmées pour le stylo. Le tableur permet, en écrivant dans les cases du tableau, d'enregistrer les sélections que l'utilisateur a considéré comme pertinentes, leurs résultats associés ou des annotations libres. En pointant sur le tableau avec le stylo, le chercheur pourra par la suite, à tout moment, réafficher ces données sur l'écran du stylo. Enfin ce tableau permet d'appliquer une même fonction à des données différentes (voir 3.4.3 pour plus de détails). Nous décrivons le système à travers deux scénarios illustrant des possibilités d'interaction différentes. Les annotations servent par conséquent d'index pour accéder au flux d'interaction. Ce type d'indexation est similaire par exemple à l'idée de ChittyChatty [KW08], ou au principe du SmartPen de Livescribe : il s'agit d'indexer un flux par la prise de notes, mais ici, le flux est un flux d'interactions et non un flux audio, et, en plus d'une indexation, le tableau permet aussi de réutiliser interactivement les interactions. Ces scénarios sont directement issus des entretiens *in situ* avec AV (INSERM) et TR (Institut Pasteur).

Dans le premier scénario, la biologiste (AV) a imprimé un graphe modélisant les composantes d'une protéine et permettant de prédire ses interactions avec un vaccin anti-HIV (figure 3.2.a,d). Avec le stylo, elle entoure des sous-ensembles de noeuds du graphe et, en sélectionnant une des fonctions figurant en-tête du tableau, elle invoque des calculs divers sur les caractéristiques de ce sous-ensemble. Ces calculs permettent à la biologiste d'établir des propriétés de ses données : avec le coefficient de connectivité (CC) elle identifie des groupes d'acides aminés non co-léthaux ; avec la moyenne d'incidence sur un noeud (I) elle peut détecter une position dans la protéine qui mute de façon très isolée.

Dans un deuxième scénario, l'imprimé comporte une série d'images - ou cartes - de dynamique cellulaire prises à des instants successifs (figure 3.2.b,c). Chaque carte, produite par une technique de spectroscopie dite RICS (Raster Image Correlation Spectroscopie), représente des valeurs quantitatives : nombre, vitesse, ... associées à des molécules visualisées à l'échelle moléculaire (résolution : 5 micro-mètres). A travers ces cartes dynamiques, le biologiste

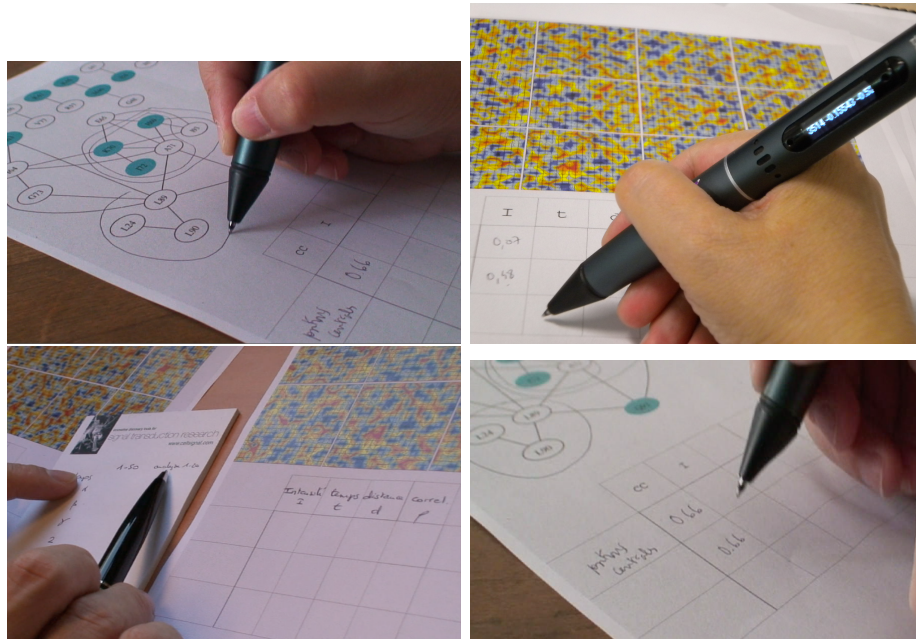


FIGURE 3.2 – (a) Modélisation d'une protéine pour la conception d'un médicament anti-HIV. L'utilisateur sélectionne un ensemble de noeuds en vue d'un calcul en temps réel. (b) Feuille de dynamique cellulaire : annotation de résultats. (c,d) : Le système permet d'annoter les données (point de la carte) associées au calcul (exemples de calcul c) intensité, temps, distance, corrélation d) : coefficient de connectivité d'une sous-partie du graphe, moyenne d'incidence sur un noeud

cherche à repérer des molécules importantes, leur position et leur évolution dans la cellule étant indicative de leur fonctionnement, ainsi que la manière dont les molécules interagissent. Le stylo permet de retrouver ces informations, de repérer des distances intracellulaires et de calculer des corrélations entre les points.

3.1.2 Ecriture et composition musicale

Les questions de recherche explorées avec des compositeurs de musique contemporaine comportaient aussi le lien entre papier et ordinateur, ainsi que l'utilisation du stylo numérique pour programmer à partir de gestes. Le projet Paperoles analysait l'utilisation du papier dans le processus de compo-

sition [LMD07]. Dans le projet Musink qui a suivi, Théophanis Tsandilas a développé un logiciel, Musink, permettant de lier des gestes de dessin et des notations pour des partitions, logiciel que nous avons mis en situation auprès des compositeurs lors d’ateliers participatifs pour le faire évoluer [TLM09].



FIGURE 3.3 – Composition musicale et papier avec Musink.

3.2 Ecriture et geste

La physicalité de l’écriture est présente directement à travers le geste et les propriétés particulières du papier [SH02], qui sont illustrées ci-dessous par des compositeurs puis des biologistes.

3.2.1 Geste et écriture musicale

L’écriture, notamment l’écriture de la musique, est souvent décrite sous son aspect d’opération physique, de *relation physique au papier*, comme à un interlocuteur. La feuille est le support de *chemins qu’il reste à tracer*, contrairement à l’ordinateur où tout est programmé d’avance, et l’objet physique qu’est la feuille offre un support souple d’organisation pour externaliser et structurer des idées.

Nombreux sont les compositeurs rencontrés qui *dessinent leurs idées musicales* sur le papier : esquisses d’architecture générale d’une pièce (fig. 3.2.1.a), imbrication de formes (blocs gigognes de Leroux), interprétations diverses de courbes de fréquence (fig. 3.2.1.b, 3.1.2.b), projetant souvent leur sens mathématique dans un espace inattendu, e.g., courbes coupées pour créer des durées.

Une description plus détaillée de ces aspects est fournie en annexe A.1, ainsi que dans l’article [LMD07].

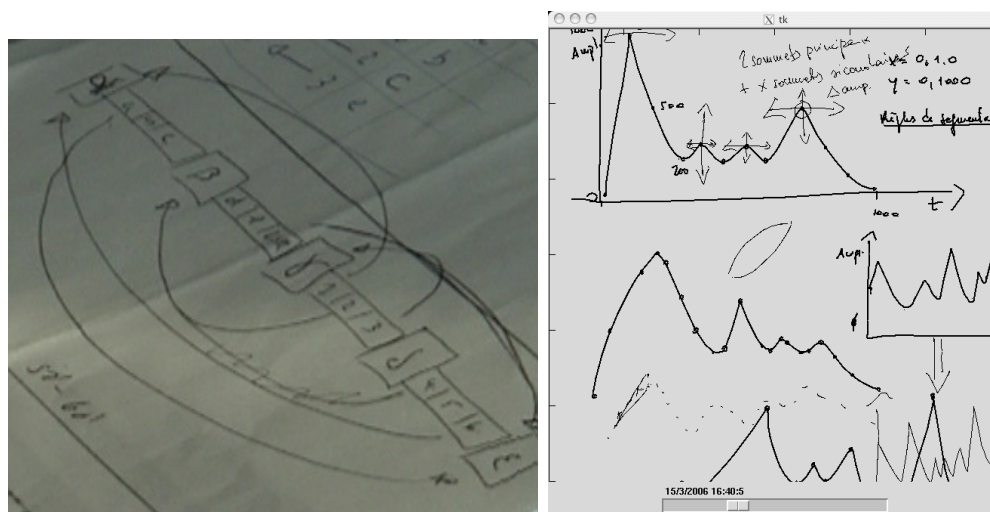


FIGURE 3.4 – a) Schéma d'une pièce de MM. b) Définition d'une enveloppe à partir d'une courbe dessinée au stylo sur du papier par MS (copie Anoto avec une barre de défilement pour rejouer le tracé).

3.2.2 Les gestes avec stylo pour interagir dans l'activité scientifique

Nous avons été frappés, lors d'un atelier de prototypage participatif, par le naturel avec lequel des bioinformaticiens, pourtant pour la plupart programmeurs, peuvent utiliser les gestes avec le stylo et le papier pour interagir. Sans ce que cela soit lié seulement à l'écriture, ce phénomène est sans doute partiellement lié à l'habitude des notations manuscrites dans les cahiers de laboratoire, et peut-être aussi à la pertinence du papier pour le prototypage d'interactions nouvelles [SH97], nous y reviendrons (chapitre 6). Lors d'un brainstorming, certains ont ainsi suggéré d'utiliser le stylo comme une souris en le munissant d'un laser à l'extrémité pour naviguer dans les informations affichées à l'écran ou pour manipuler un slider bi-dimensionnel pour filtrer l'affichage d'une molécule en fonction de deux variables (figures 3.5.b et 3.5.d). Ce panneau pouvait resservir pour plusieurs analyses, et pouvait aussi être conservé dans le cahier de laboratoire pour rejouer une analyse ultérieurement. Pointer sur un atome donnait sa position et le nom de son résidu dans la protéine. L'un des participants a montré comment spécifier des données incomplètes en se servant d'une donnée disponible sur une autre feuille, en procédant par une sorte de *pick-and-drop* invisible (figure 3.5.a).

Dans l'autre cas, l'imprimé contenait un réseau d'interactions protéiques résultant d'une analyse complexe, et servait de point de départ pour afficher des données plus primaires, comme les protéines ayant servi à calculer le réseau (figure 3.5.c).

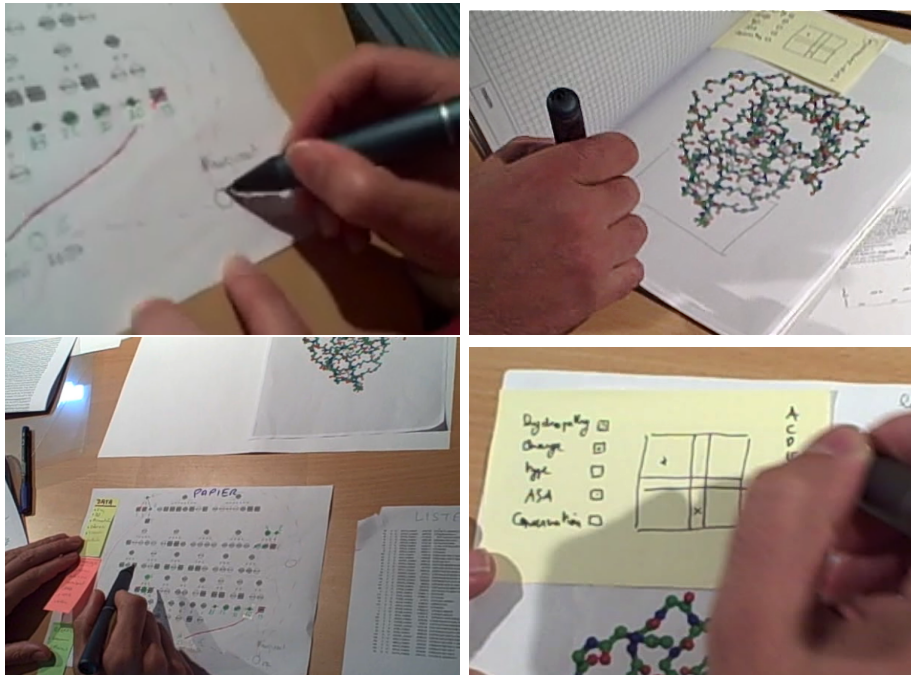


FIGURE 3.5 – Prototypes vidéo : (a) compléter un imprimé (un réseau d'interactions) par les données d'un autre (une voie métabolique) (b) un panneau de commandes papier conservé dans le cahier de laboratoire pour rejouer une analyse ultérieurement (c) navigation à partir d'une feuille de données dans des représentations affichées à l'écran (d) slider bi-dimensionnel.

3.3 Du geste à la réflexivité

Derrida, dans "La voix et le phénomène" [Der67], relève que le signe écrit n'est classiquement considéré que comme un outil d'interface entre la chose et son intuition, et non pas un créateur ou donateur de signification. Ainsi dans le système saussurien [dS16], le signe écrit n'aurait d'autre rôle que la représentation de la parole : structure qui serait directement héritée

du "phonocentrisme antique". Ce qu'il est possible d'observer, tant avec les compositeurs qu'avec les chercheurs en biologie, est bien différent, puisqu'il semble que c'est à travers une individuation à la fois gestuelle et visuelle que les tracés produits permettent la réflexivité et une création efficace de significations. Derrida décrit ainsi l'écriture comme un processus évolutif où main et langage, sensibilité et intelligibilité, contribuent à une évolution mutuelle. Comme le souligne Bodon [Bod20], on peut y voir une dynamique de signification, passant par le corps :

Le signe écrit est en réalité au plus proche de la vie, en ce qu'il n'est pas un supplément, superposition ou représentation, mais bien une manifestation immédiate de celle-ci dans un prolongement. Par la trace du graphisme se dessine le «schéma corporel» de l'Être et de son expression qui, en lui donnant une valeur spatiale, associe le vécu intentionnel du sujet avec le geste du corps l'exprimant. Il y a de cette manière une signification immanente de l'écrit transmise à la perception sensible, au sens que Merleau-Ponty [MP53] donne à propos des significations «non parlantes» : des significations dont la dynamique propre donne une «valeur expressive» [MP45] qui, loin de rompre le rapport significatif que l'Être a au monde, en réalité le prolonge et lui permet de s'y inscrire de manière sensible en lui donnant un corps.

L'interaction est ainsi individuante aujourd'hui à travers l'industrie des traces d'interactions et ce qu'on appelle les architectures de participation [O'R05] : « The virtualities that are excavated in the software's operation are the captured operations and interactions of the users of the software. The capture of these operations is usually via databases but the process is more precisely described by the phrase "architectures of participation" » [O'R05] [Mil11]. Mills souligne également le potentiel individuante du mécanisme d'annotation, non pas seulement parce qu'il fournit un champ libre pour l'utilisateur, comme c'est le cas dans Twitter, mais parce qu'en tant que champ libre, il permet l'adaptation de mécanismes :

Rather, annotations would give developers the ability to create and name their own new namespaces which could be added to tweets via their own Twitter client software and which they could also parse and publish within that same software. (...) From the Simondonian perspective such a broadening of the Twitter associated milieu can be understood as an increase of indeterminacy

in the system which in turn enables the possibility for further concretization.

3.3.1 Trace de l'activité scientifique et production de signes

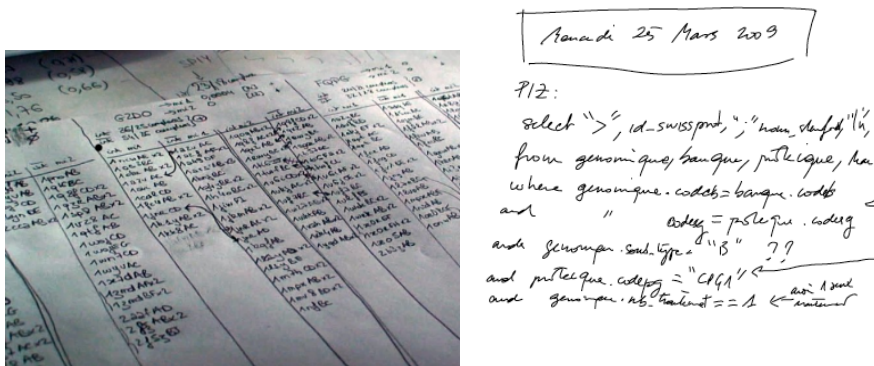


FIGURE 3.6 – Recopie de données, code SQL recopié dans le cahier.

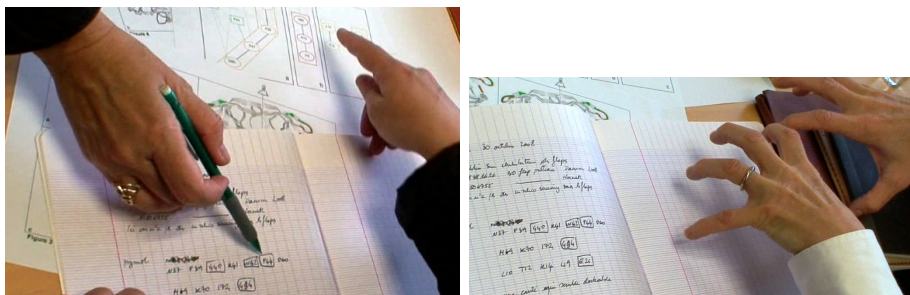


FIGURE 3.7 – (a) Recopie de données sur le papier pour discuter. (b) "Moi je gratte".

Chez les chercheurs en biologie, l'écriture permet de *construire* leurs problématiques scientifiques. L'appropriation d'un problème, la nécessité d'obtenir une concentration suffisante demandent ainsi une action "productrice", qu'on pourrait presque qualifier d'incantatoire, qui passe par

l'écriture : préparer du matériel de rédaction, amorcer les premières formulations : "j'ai besoin de me concentrer énormément sinon je ne dépasse pas le taux d'énergie nécessaire à ... voilà... Il me faut un rituel obligatoire...". L'écriture est ainsi un déclencheur de la réflexion, même si elle ne consiste qu'en l'acte physique de tracer sur le papier, sans création de contenu original. On observe en effet, chez plusieurs scientifiques de notre étude (TR, AV, JB), une activité de *recopie pure et simple* de leurs données de l'ordinateur sur le papier, production d'un supplément de signes a priori inutiles. Par exemple JB ou AV recopient des tableaux de chiffres, des listes de noms de gènes, des valeurs calculées, des graphes, ... pour "rentrer dans les données" (figures 3.6.a ou 3.7.a). Comme l'exprime JB : "Quand tu l'as écrit, tu l'as lu!" [LTM09]. Il n'est pas rare de rencontrer souvent dans les cahiers du code source, en SQL ou en python, recopié depuis un fichier (figure 3.6.b), toujours par besoin qu'ont les biologistes de s'appropriier l'information, de s'en imprégner. Ce recyclage de l'information compilée forme ainsi un compost propice à la réflexion et à l'émergence d'idées nouvelles ("moi je gratte avec mes doigts" dit explicitement AV, figure 3.7.b).

3.3.2 Ralentir l'interaction pour composer

Nous avons pu assez souvent constater que pour un compositeur, la rapidité - rapidité obtenue par les outils et les algorithmes - est plutôt une source de méfiance, et le papier joue un rôle à cet égard en permettant une réflexivité. Lanza [LDS04] décrit ainsi la rupture résultant d'un travail à des vitesses différentes : "Je pense que "pareil plus vite" cela n'existe pas ... Dès qu'une opération se fait très vite, on a tendance à la mépriser. Il faut toujours y revenir, passer un peu de temps, re-complexifier le point de départ. Ce problème de vitesse est le même chez les chercheurs en biologie (AV nous déclare parfois qu'en informatique "tout va plus vite que ce que moi je pense") qui revendiquent cet "espace de ralenti" que constitue le papier pour ancrer des décisions. Le compositeur explique cette impression par l'importance du geste et du temps qu'il prend : "Travailler à la main avec des formalismes, c'est accomplir un geste d'artisan ou d'écrivain." Il est d'ailleurs conscient des avantages et des dangers inhérents à chacune des méthodes : l'ordinateur produit une complexité plus facilement, et aussi peut-être plus artificiellement, mais il y a un aspect artificiel aussi du côté du papier : "Comme cela est très long à être couché sur le papier, cela finit par être justifié, d'une certaine façon, par le temps qu'on y a passé. Certes,

on a ainsi tout loisir de métaboliser ce qu'on fait, mais c'est dangereux aussi bien, puisque cela pourrait justifier n'importe quoi." XD exprime lui aussi ce besoin de "ralentir" en quelque sorte, mais c'est l'ordinateur qui lui rend ce service : "Je ne compose pas avec l'ordinateur. L'ordinateur me sert à composer plus lentement - ce n'est pas une boutade. Je perds beaucoup de temps pour gagner de l'espace.". Comme le dit un compositeur, ce temps progressif dénie tout aspect de transcription : "Pour moi une partition, ça n'est pas la transcription d'une idée. C'est au fur et à mesure... Je ne peux pas séparer l'idée de la rédaction. Il n'y a pas de code de type : "ah je veux dire cela, de cette manière". L'écriture est comme un "terreau" : "J'utilise les partitions imprimées comme un palimpseste : j'écris l'essentiel, j'imprime, j'édite en couleurs, je garde l'historique."

3.3.3 Ecritures transductives

Il est intéressant d'essayer d'analyser la transductivité à l'œuvre dans les processus d'écriture que nous venons de décrire (sur la transduction cf chapitre 2, section 2.7.1). J'avais trouvé très surprenante l'utilisation du dessin pour composer, les modalités pouvant paraître éloignées (modalités visuelle et auditive). Mais il semblerait y avoir de la musique au cœur du dessin, tant dans le geste, puisqu'il y a le geste des instrumentistes, que dans les figures produites, souvent analogues à des représentations du son (lignes courbes, zigzagantes, contours) et très présentes dans les notations des compositeurs contemporains. Ces éléments permettraient de voir dans le dessin un transfert transductif de structure d'un domaine à l'autre. Comme décrit ci-dessous (section 3.4.3), les identificateurs de *Musink* qui permettent de programmer avec des gestes peuvent d'ailleurs être purement graphiques. La différence soulignée par un compositeur (section 3.2) entre l'emprunt d'une forme pré-existante à travers l'interface et les *chemins qu'il lui reste à tracer* est ainsi l'occurrence du geste d'écriture musicale comme partie d'un processus de prise de forme par laquelle la pensée musicale s'individue sous forme d'une composition. Cette opération est bien décrite dans sa dimension matérielle, notamment en termes de geste, de formes dessinées et de temporalité (ralentir).

L'écriture pour les biologistes comporte-t-elle ce type de transfert analogique ? L'acte de recopie, on l'a vu, est considéré comme un rituel déclencheur de la réflexion. Moins que d'analogie, il s'agirait peut-être dans ce geste "pur" de ce mécanisme de motricité primaire de l'imagination que Simondon a iden-

tifié dans le cycle des images (voir chapitre 6, section 6.3.2), où transductivement, on passe d'un geste interne à la perception, puis à la constitution d'images jusqu'à l'invention.

3.3.4 Persistance de l'écriture

Indépendamment du geste, le phénomène de persistance est inhérent à l'écriture. Le statut de l'ordinateur et des réseaux numériques à cet égard est ambigü. A la fois source privilégiée de rétentions tertiaires [Sti94], et expérience d'une connectivité permettant des interactions sans limites [LEJ17], l'âge informatique peut être analysé comme un retour à une culture orale dans laquelle le savoir passe par une navigation et une interaction justement sans trace et sans reproductibilité [Lev90]. L'annexe A.2 contient des éléments sur cette problématique tant chez les compositeurs que chez les biologistes.

3.4 Ecriture et mise en relation

Selon Goody [Goo79], l'introduction de l'écriture a permis un développement technique de l'activité intellectuelle par une spatialisation de la pensée orale, enfermée dans la succession temporelle : on ne peut pas dire deux mots à la fois alors qu'on peut avoir une vue simultanée et donc globale des mots écrits. L'écriture même linéaire amène ainsi la possibilité de mettre en rapport des idées, soit de façon implicite, soit de façon plus explicite avec les listes et les tableaux. Si l'écriture est analysée comme cette mise en relation rendue possible par la spatialisation, je propose qu'il soit ensuite possible de généraliser le principe de mise en relation comme procédant d'une nouvelle forme d'écriture : à la fois attachée au geste et à la trace, mais opérant une mise en relation plus généralisée. Le paradigme n'est plus celui d'un passage de l'oral à l'écrit (ça ne l'était déjà plus comme on l'a vu ci-dessus, cf 3.3), mais celui d'un passage de l'interaction à une écriture de l'interaction reposant sur des relations.

3.4.1 Listes et tableaux

La liste est l'ébauche de la notion de classification, de définition d'un ensemble constituant un tout, mais elle est aussi une première forme de pro-

gramme, puisqu'elle est souvent, dès les débuts de l'écriture, utilisée comme moyen de spécifier des recettes ou des listes d'instruction [Goo79]. Le tableau, ensuite, constitue un instrument d'association multiple, en ligne et en colonne, dont l'intérêt est aussi de permettre de définir de nouveaux éléments de manière systématique (comme avec le tableau des éléments de Mendeleïev). Enfin la formule est un procédé formel, qui permet de manipuler des raisonnements indépendamment de leur signification.

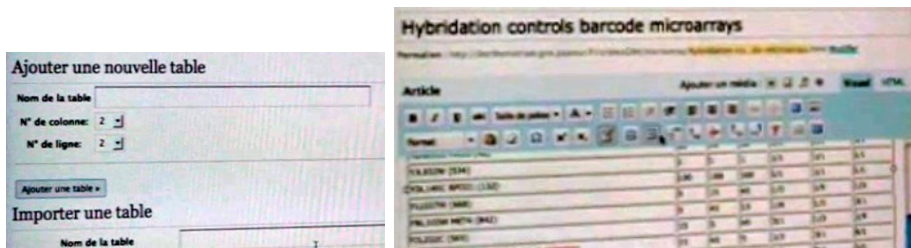


FIGURE 3.8 – Données tabulaires dans re-blog avec des extensions Wordpress

Les biologistes font bien entendu appel à ces structures de manière systématique dans leur cahier de laboratoire. Nous avons abordé cette question avec eux sous plusieurs formes.

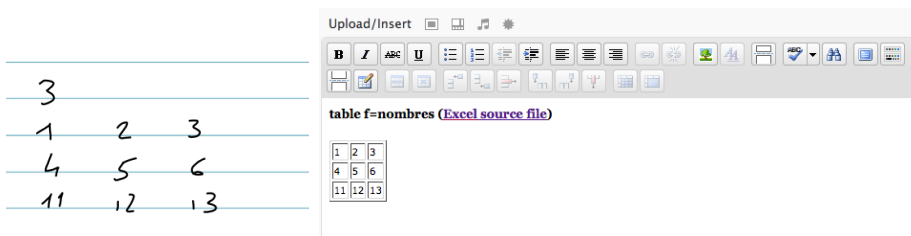


FIGURE 3.9 – Entrée manuscrite et transfert de nombres sur l'ordinateur et le blog : (a) page manuscrite (b) données transférées et éditables sur le blog.

Entrée de tableau avec le stylo A la suite d'un atelier de prototypage (fig. 3.10.a) et d'un interview abordant la possibilité de définir une courbe avec un tableau de données (fig. 3.10.b), nous avons développé un outil pour le stylo Livescribe qui permet de transférer un tableau numérique du cahier vers le blog (fig. 3.9).

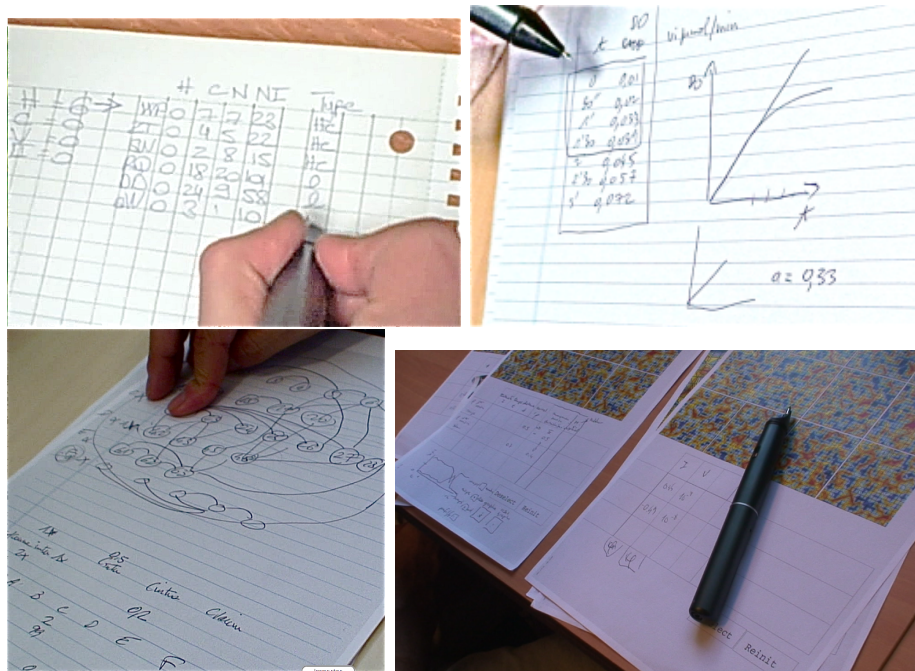


FIGURE 3.10 – Conception participative d'un tableur pour le Livescribe. (a) Atelier participatif centré sur l'entrée de données tabulaires (b) interview-brainstorming sur la spécification d'une courbe dans un tableau (c) brainstorming sur les formules pour la feuille de modélisation pour un médicament anti-HIV (d) brainstorming sur les formules pour la feuille de dynamique cellulaire

3.4.2 Créer des relations entre interactions

Traces d'interaction Une trace de l'interaction ne constitue pas en soi une écriture. La plupart du temps, même lorsque le système interactif dispose d'un mécanisme de journalisation ou d'historique, il s'agit de trace contingente, effet de bord de l'interaction. En général, ces données de journalisation sont d'ailleurs difficilement manipulables par l'utilisateur, qui n'a souvent que peu de contrôle sur leur production. Dans *graphenda*, c'est sur ce point que nous insistons : il y a inscription lorsqu'il y a notation volontaire, que ce soit par un signe graphique ou par des mots existants dans le langage parlé. En cela, bien évidemment parce que notre propos est de tracer l'activité intellectuelle, nous allons dans le même sens que Kalnikaité, et Whittaker [KW07] : nous proposons une sélection des éléments de mémorisation par l'inscription

avec un stylo.

Plusieurs niveaux de trace et de mise en relation sont envisageables :

1. un niveau immédiat, qui est juste le *tracé de l'encre* sur le papier,
2. un niveau qui est celui de la journalisation, d'une *trace des interactions* effectuées,
3. un niveau qui permet de relier un tracé avec une interaction,
4. le niveau des annotations *inscrites* dans le tableau qui relie des données avec des interactions.

Ces niveaux sont observables dans la composition musicale. Le compositeur peut décider que les diverses transformations qui s'opèrent dans la genèse d'une œuvre laissent une trace, à titre d'indice plus ou moins caché, qui permet de relier entre elles les idées musicales émergeant durant la genèse de l'œuvre. Les contraintes du papier fournissent presque automatiquement une trace de ces interactions. PL rédige sa partition au crayon et à la gomme sur un seul et même cahier de papier à musique, qui deviendra le manuscrit définitif remis à l'éditeur. Il peut aussi être amené à photocopier une partition en cours, soit pour en garder une archive (en cas de perte de l'original), soit pour recopier un certain passage en le variant (élision de notes, reprise de certains paramètres seulement, etc.), dans l'écriture d'un passage ultérieur de l'œuvre en cours ou bien d'une autre œuvre en chantier. Cette dernière opération ressemble fortement, mais dans un "métabolisme" différent, à la fonction copier/coller d'un traitement de texte ; cependant elle est en partie impossible avec un tel logiciel puisque avec le papier, la sélection des aspects pertinents à recopier/reprendre s'effectue par des annotations sur la photocopie.

Mise en relation dans la dimension temporelle La spatialisation des flux temporels permet également une mise en relation des informations par une vision globale qu'elle apporte. Nous l'avons observé à travers l'utilisation d'outils de mise en relation dans le temps des informations sur l'activité, qui sont décrits en annexe A.3.

3.4.3 Ecriture et programmation

Si l'indexation avec la possibilité de mise en relation constitue bien un "passage à l'écriture" de l'oralité interactive, on peut aussi analyser le rapport

entre interaction et programmation. Les travaux de ma thèse sur l'interaction et la programmation [Let99b] [Let01a] [Let01b] soulignaient l'importance du paradigme de programmation dans l'interface (PITUI) pour des utilisateurs capables de programmer, mais intéressés par les résultats d'un programme plus que par la programmation de ce programme. La programmation apparaît ainsi non comme une phase séparée de construction et de conception précédant l'utilisation interactive, mais comme *une forme particulière d'interaction*.

La programmation, comme forme moderne l'écriture (Derrida le propose : "Cette écriture non-phonétique, c'est la programmation et l'informatique sous toutes ses formes" [Der68]), est une mise en relation logique qui prend la suite des listes, tableaux et formules. Fonctionnant comme des signes symboliques, des gestes sans correspondance phonétique peuvent fonctionner comme une écriture, comme dans les écritures non phonétiques [Chr01].

Programmation par le geste

Avec les compositeurs, nous avons d'abord réalisé quelques prototypes très simples, avec pour objectif une prise en main de la technologie. Nous disposions d'un stylo Logitech et d'un Easybook (Oxford). Une maquette OpenMusic² a été construite à partir de traits tracés au stylo dans un espace à deux dimensions représentant le temps et des fréquences par MS (fig. 3.4.3 gauche). Il s'agissait d'une petite expérience destinés à démontrer le dispositif au musicien et à intégrer la technologie dans un environnement de CAO. Toute la mesure de ce principe de programmation par le geste a été donnée dans *Musink*, comme on le voit dans les figures 3.4.3 [TLM09]. Les utilisateurs n'ont pas besoin d'avoir une définition sémantique formelle d'un geste Musink au moment où il est dessiné sur le papier : c'est un élément structural de la partition ou le symbole d'une idée abstraite. L'utilisateur peut y revenir plus tard pour, par exemple, lui attribuer une signification sémantique (un comportement dans Open Music) ou le lier à un autre geste. C'est ce que nous avons appelé un principe d'interprétation différée semi-structurée. Musink utilise des identificateurs pour définir la sémantique, l'identificateur pouvant être sa propre représentation graphique (par exemple, une ligne horizontale en zigzag peut servir d'identifiant pour un geste "trémolo", le distinguant des autres lignes horizontales). Tout identificateur peut représenter

2. Une maquette est une surface graphique représentant le temps, dans laquelle on dispose les patches pour les jouer.

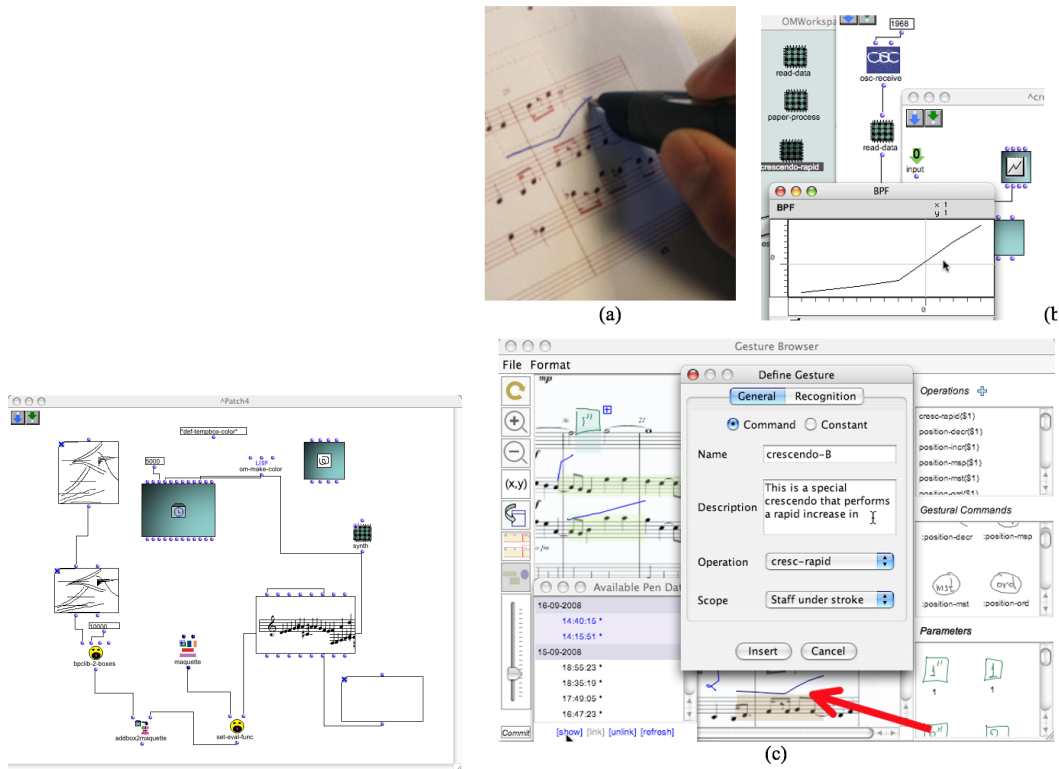


FIGURE 3.11 – (gauche) Patch de génération d’une maquette à partir du dessin à la main. (droite) Programmer par le dessin dans Musink : (a) dessin sur le papier pour exprimer un nouveau type de crescendo, (b) définition du pattern de vibration du crescendo dans OpenMusic, (c) définition de la classe crescendo dans le Gesture Browser de Musink

une fonction informatique, notamment un patch OpenMusic. La fonction peut prendre n'importe lequel des éléments suivants comme arguments : positions de la partition, symboles musicaux, plages temporelles, texte et paramètres numériques associés à l'identifiant, soit directement, soit par le biais de connecteurs.

Programmation dans le tableur papier

Le "tableur" proposé dans *graphenda*, avec les colonnes correspondant aux fonctions et les lignes correspondant aux données, peut servir à lancer d'autres calculs sans re-sélectionner les données. Ainsi, lorsque l'utilisateur a rempli la cellule (1,1) pour annoter le résultat de la fonction "calcul de coefficient de connectivité", il peut ensuite lancer un autre calcul sur les données de la ligne 1 - par exemple "moyenne d'incidence" - en pointant dans la cellule (1,2) et peut noter sur un tableau ce qu'il juge important concernant les données sélectionnées ou le calcul. Ce système s'appuie sur l'API de programmation du stylo numérique Livescribe, qui permet de définir un imprimé et d'associer des comportements aux interactions du stylo sur des zones "actives" du papier définies par l'utilisateur. Lors des entretiens autour de *graphenda*, les biologistes, inspirés par le fonctionnement du tableau imprimé sur les feuilles de données et l'accès aux calculs par sélection d'une colonne dans le tableau, ont précisé leurs besoins en terme d'exploration de formules d'analyse de leurs données. Pour le scénario de recherche sur HIV, ce sont les formules de vaccin qui sont encore en phase d'élaboration (figure 3.10.c). Pour le deuxième cas - les images de dynamique cellulaire - ce sont les méthodes d'investigation qui sont en cours de définition : que faut-il regarder ou comparer exactement dans les cartes, à quelle échelle, à quelle distance (figure 3.10.d) ? A la suite de cette première implémentation nous avons donc imaginé lors d'un mini-brainstorming plusieurs manières de disposer les résultats en tableau, et divers modes de définition des éléments de programmation, c'est-à-dire la définition de variables, la composition de fonctions prédéfinies, comme la corrélation entre des valeurs issues de calculs différents.

3.4.4 Synthèse rhétorique

Un des principaux apports de Goody [Goo79] a donc été de montrer comment une technologie, l'écriture, a pu changer la nature même de la pensée,

procédé rhétorique	type d'inscription
énumération, inscriptions ordonnées possédant une même origine	traces automatiques d'interaction
narration (<i>story telling</i>), relie des éléments hétérogènes	fil d'activité, trace des décisions, histoires de biologistes [OAKB01]
argumentation, noue le divers dans un raisonnement et non plus une histoire	cahiers de laboratoire, hypothèses
perception, représentation visuelle	visualisation d'information, impression de graphes

TABLE 3.1 – Proposition pour une rhétorique de la réflexion scientifique numérique

et en particulier de la pensée rationnelle et scientifique. Bachimont [Bac04] reprend cette problématique par rapport aux technologies informatiques : en quoi le recours à des représentations calculées induit-il une rationalité particulière? Selon cet auteur, le calcul instaure une sorte d'équivalence entre temps et espace, le temps est celui qui est nécessaire à l'exploration systématique d'un espace de calcul, et l'espace est celui qu'il faut parcourir en un certain nombre d'étapes de calcul. La fonction cognitive du calcul correspondant à la spatialisation synoptique de l'écriture [Goo79] serait donc la notion d'*exploration systématique*. Cette notion pose cependant un problème d'intelligibilité : si le calcul réduit la complexité à un parcours systématique, cela ne rend pas les résultats de cette exploration intelligibles pour autant. Pour cela, Bachimont propose une articulation entre calcul et mémoire afin de rapporter les résultats calculés à nos connaissances mémorisées. Cette synthèse discursive nécessaire permet comme un fil conducteur d'unifier et de relier les diverses représentations données par le calcul. L'auteur décrit cette *rhétorique* à travers quatre procédés : l'énumération, la narration, l'argumentation et la perception. Dans la table 3.4.4, nous mettons ces notions en perspective avec les types d'inscription que nous avons décrits pour le cahier de laboratoire et notre écriture augmentée.

Comme le remarque Bachimont [Bac04], inventer pour inventer, c'est la tradition que nous lègue la rhétorique antique et médiévale, en permettant

d'articuler étroitement l'invention et la mémoire : "J'innove parce que je répète, j'invente parce que j'ai un fonds que je me suis assimilé". Ce que nous proposons avec *graphenda*, c'est justement cette articulation qui passe par une écriture - au sens classique du terme - qui d'abord *annote* mais aussi articule la pensée au donné numérique en l'indexant.

3.5 Ecriture instrument et écriture objet

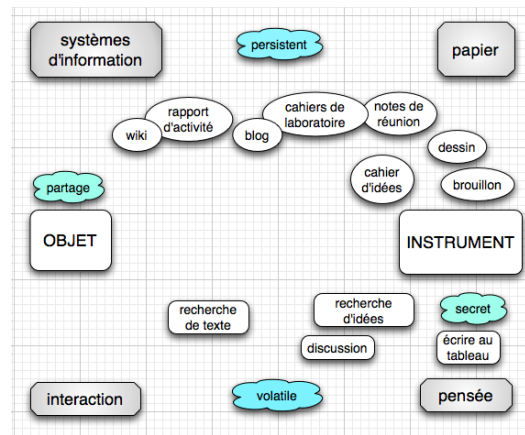


FIGURE 3.12 – Cartographie de l'écriture axée sur deux pôles : cahier-objet et cahier-instrument.

Comment situer ce que nous venons de décrire comme écriture de l'interaction dans le cadre général de la rédaction d'un cahier de laboratoire ? Quelle différence y a-t-il entre l'écriture comme inscription et mise en correspondance et la rédaction d'un cahier ? Les biologistes écrivent à la fois dans le but de produire de l'information stockée et structurée dans un système d'information numérique et par besoin de récolter et de travailler leurs idées sous une forme plus discursive.

Cette distinction correspond aux deux types de médiation de Don Ihde [Ihd79], la médiation incarnée où le cahier est un instrument, et la médiation herméneutique où le cahier est une représentation. Klokmose et Zander [KZ10] proposent également ce type d'analyse en utilisant le cadre de la théorie de l'activité, et décrivent le cahier de laboratoire comme oscillant entre *instrument* et *objet*. En effet, lorsque que le cahier sert de dispositif d'inscription, il est un instrument, alors qu'il est un objet lorsqu'on le

considère comme contenant une information à lire, à communiquer, à partager. Le diagramme cartographique de la figure 3.12, par une prise en compte de cette intentionnalité sous-jacente à l'acte d'écrire, souvent effectivement oscillante. Il permet donc de modéliser le statut du cahier de laboratoire autour de ces deux pôles :

- **cahier-objet** : l'artefact en ce qu'il a trait à la production d'un système d'information à but de communication, de partage et d'activité réflexive ;
- **cahier-instrument** : l'artefact en ce qu'il est l'instrument de l'acte d'écrire lui-même, en tant que vecteur de la pensée et en tant qu'il effectue en même temps un enregistrement de cette dernière dans un support externe.

Le diagramme est également orienté du bas vers le haut, au long d'un axe qui part du volatile vers le persistant. On trouve en haut d'un côté par exemple les bases de données, rapports d'activité, sites Web externes, et de l'autre les cahiers de laboratoire manuscrits, trace définitive d'un processus scientifique. Ce qui est caractéristique de cette partie du diagramme est l'utilisation du support papier comme support d'archivage [LMD07]. Vers le bas, ce sont du côté objet les interactions avec un système d'information : recherches, visites de pages Web, du moins quand il n'en reste aucune trace sous forme de log ; de l'autre côté, on trouve par exemple les schémas au tableau pendant une discussion.

L'écriture de l'interaction se situe donc plutôt du côté du cahier instrument : elle est opérateur d'enregistrement et de spatialisation d'une pensée non discursive, celle des explorations interactives avec un ordinateur. Mais elle s'intègre dans un cadre plus général, celui de la description et de la trace de l'activité d'un chercheur travaillant dans un laboratoire et au sein d'une équipe.

3.6 Résumé

Dans ce chapitre, à partir des explorations et analyses de l'écriture interactive chez les compositeurs contemporains et les chercheurs en biologie, j'ai tenté de proposer une conception de l'écriture interactive comme une évolution de l'écriture traditionnelle entre interaction et programmation. L'objectif était également d'analyser les différents aspects de la matérialité et de faire progresser notre réflexion sur l'interaction matérielle. S'appuyant

sur une physicalité directe à travers le geste et l'interaction physique avec le support papier, j'ai développé le lien entre geste et réflexivité qui se développe dans l'inscription et la production de signes physiques. J'ai ensuite étendu le concept d'écriture interactive selon la dimension de la mise en relation, qui est sous-jacente dans l'écriture classique à travers l'opération de spatialisat-ion, et qui se prolonge dans la notion de programmation comme forme moderne de l'écriture.

Cette analyse du geste au programme, et de l'instrument incarné à l'objet herméneutique, fait écho aux études en anthropologie, notamment à celle proposée par Leroi-Gourhan dans *Le geste et la parole* [LG65], où l'histoire de l'humain est décrite au fur et à mesure des évolutions matérielles et technologiques. Elle permet également de décrire les transductions et les éléments de prise de forme qui s'opèrent : effectuation temporalisée d'un geste dans ou sur le papier, réification d'images pour des opérations réflexives et ajout de couches interactives au papier, mises en relations pour des possibilités d'opérations d'abstraction, d'annotation et de programmation.

Chapitre 4

Physicaliser l'interaction

Dans un raisonnement sur la matérialité, comme nous essayons de le mener à travers une figure faisant intervenir l'avènement d'être ou individuation, l'interaction tangible détient normalement le haut du pavé. Ce chapitre adresse ainsi la question du tangible, et ce à travers plusieurs thèmes. Un premier thème vient du fait que l'interaction tangible s'est trouvée pertinente à un moment de mon parcours en termes de problématiques associées à la sécurité aérienne, comme c'est le cas pour les projets Strip'TIC et Airtius qui sont ensuite décrits dans les sections 4.2 et 4.3. Le chapitre se conclut par des questions (4.4).

4.1 Interaction tangible et sécurité aérienne

4.1.1 La sécurité telle qu'elle se fait

J'ai participé à plusieurs projets dans lesquels la sécurité (safety) est une composante déterminante, si elle n'en est pas le centre thématique - comme elle l'est d'ailleurs presque à chaque fois qu'il s'agit d'aéronautique. Je citerai à cet égard le projet STAMP, où j'ai étudié les besoins des pilotes face aux orages de la zone de convergence inter-tropicale, et conçu un prototype de visualisation en collaboration avec un étudiant IENAC 2ème année, travail publié à la conférence 3DUI [LZVC15]. Cette étude, outre le fait qu'elle concerne un problème de sécurité majeur dans la circulation aérienne, m'a permis de comprendre en partie le quotidien de la sécurité vue d'un pilote, comme par exemple la distance qu'il doit pouvoir avoir par rapport à la peur :

lors d'un design walkthrough du prototype, le pilote a réagi au fait qu'on lui affiche les cumulonimbus au-delà de la portée du radar par un : "Ça me fait peur !" (on trouve une analyse de ce problème chez les contrôleurs dans étude "Quand les avions entrent dans la salle : la sécurité telle qu'elle se fait" de Dubey et al [DGM⁺01]). Dans le projet Strip'TIC - où j'ai effectué deux analyses ethnographiques portant l'une sur la gestion du temps [LHL⁺13] l'autre sur les gestes [GMD⁺14][Let12] chez les contrôleurs aériens, et réalisé avec Rémi Lesbordes et Jean-Luc Vinot la conception d'une interaction de type "calcul tangible" pour simuler des séquençements en approche [LHL⁺13] - notre réflexion portait sur une composante essentielle de la sécurité, liée au strip et à la cognition collective, distribuée et incarnée qu'il rend possible par sa matérialité.

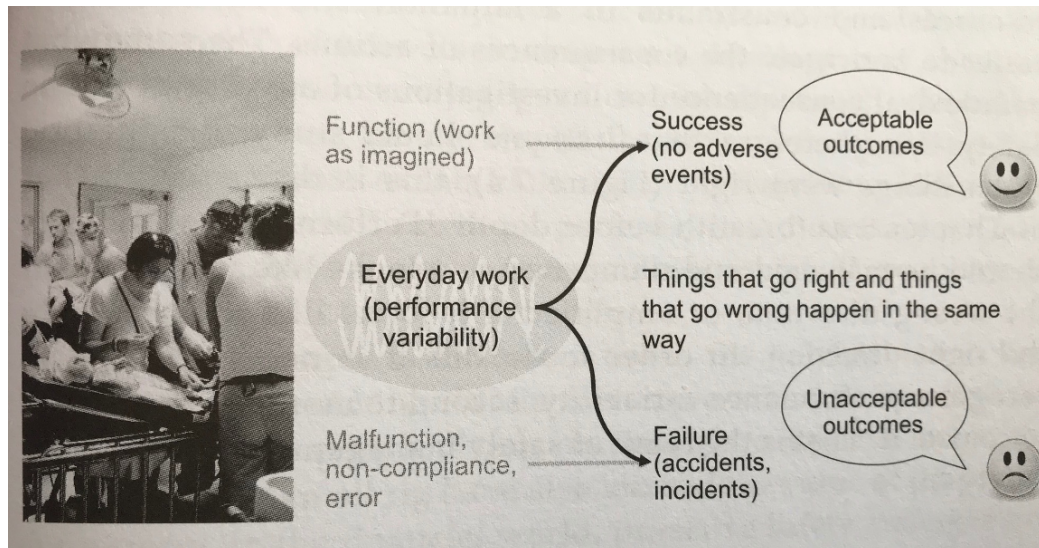


FIGURE 4.1 – La vision Safety II des erreurs et succès

L'ouvrage "Safety-I Safety-II" de Hollnagel [Hol14] fournit un cadre théorique explicite de ce type d'analyse : à partir d'une critique des limites et des mythes de l'approche réactive de la safety, dite Safety-I, (e.g recensement des incidents et l'établissement des propriétés de sûreté en fonction des risques de panne, etc. cf par exemple [Saf10] et la table 4.1 tirée de [Hol14]), cet ouvrage met en avant la nécessité de comprendre au contraire ce non-événement continu et positif qu'est la sécurité, et de s'intéresser à tous les

éléments humains et techniques qui font que la sécurité est effectivement assurée dans les systèmes actuels. La figure 4.1 illustre cette approche dans laquelle on considère que les causes des erreurs et incidents sont les mêmes que celles qui construisent positivement la sécurité. L'objectif des études de sécurité doit être par conséquent tout autant de comprendre les mécanismes positifs que les mécanismes négatifs.

TABLE 4.1 – Comparaison de Safety 1 et Safety 2

	Safety I	Safety II
Definition of safety	As few things as possible go wrong.	As many things as possible go right.
Safety management principle	Reactive, respond when something happens, or is categorised as an unacceptable risk.	Proactive, continuously trying to anticipate developments and events.
Explanations of accidents	Accidents are caused by failures and malfunctions. The purpose of an investigation is to identify causes and contributory facts.	things basically happen in the same way, regardless of the outcome. the purpose of an investigation is to understand how things usually go right as a basis for explaining how things occasionally go wrong.
Attitude to the human factors.	Humans are predominantly seen as a liability or a hazard.	Humans are seen as a resource necessary for system flexibility and resilience.
Role of performance variability	Harmful, should be prevented as far as possible.	Inevitable but also useful. Should be monitored and managed.

Le projet AIRTIUS, décrit dans la section 4.3, est un projet où la sécurité est une composante à nouveau explicite de nos questions de recherche. Dans ce projet, qui s'intéresse à la conception d'un cockpit maximisant les capacités perceptives et kinesthésiques des pilotes, nous avons en effet élaboré un premier espace de conception autour des technologies d'interaction avancées, encadré par trois ensembles d'exigences, dont celles de safety, pour laquelle les contraintes liées à la disponibilité, la résilience et la certification ont été

spécifiées [VLPC16]. C'est cependant d'abord par l'étude de la sécurité telle qu'elle est assurée par les pilotes et les systèmes dans le système actuel que nous avons cherché à comprendre les mécanismes humains et techniques qui en décrivent les priorités, les difficultés et les réussites [LVP⁺18].

4.2 Strip'TIC : des objets-surfaces manipulables



FIGURE 4.2 – Strip'TIC

4.2.1 Les gestes des contrôleurs aériens et la sécurité aérienne

Le geste fait partie de l'environnement de travail des contrôleur.e.s aérien.ne.s au même titre que l'image radar et le strip, et joue un rôle im-

portant vis-à-vis de la sécurité aérienne. Une analyse des gestes a été menée dans le cadre du projet Strip'TIC suite à une série d'observations en juin 2012 dans les simulateurs de l'ENAC et en octobre 2012 dans la tour de contrôle de l'aéroport de Blagnac à Toulouse. Cette étude a fait l'objet d'une présentation spécifique au Forum sur l'Interaction Tactile et Gestuelle en 2012 à Lille [Let12] et est publiée dans la section "Etude de l'activité" d'un article co-écrit avec des étudiants du Master IHM ENAC-Toulouse III sur leur conception de gestes mid-air pour Strip'TIC [GMD⁺14]. Notre analyse, à la différence de l'étude de Mackay portant sur la question de la sécurité dans l'ensemble de l'activité des contrôleurs [Mac99], s'est focalisée uniquement sur la partie gestuelle.

La première phase d'observation à Blagnac a permis de constater une grande diversité des gestes dans l'activité du contrôleur. La figure 4.3 présente des images de ces gestes extraites des enregistrements vidéo. Notre acception du terme « geste » est ici très inclusive. Elle comprend tout d'abord les gestes sémiotiques, essentiellement déictiques [RS91] comme désigner un strip (Fig. 4.3.f,n) voire deux strips, par exemple pour les comparer (Fig. 4.3.o : « ben c'est qui qui part devant ? »), ou des éléments de l'image radar (Fig. 4.3.e), les gestes ergotiques, essentiellement pour la manipulation et les déplacements de strips. Elle comporte également des gestes non sémiotiques, qu'on peut qualifier selon le contexte d'épistémiques (Fig. 4.3.h,j), interactionnels [NDK⁺05] (Fig. 4.3.k), irrelevant [NDK⁺05] comme les tics ou le fait de faire tourner son stylo, ou les « beat gestures » [Cas98], mettant l'accent sur certains points de leur discours (Fig. 4.3.a). Les gestes observés s'accompagnent ou non de l'utilisation d'un instrument (stylo, crayon, souris, micro). Une seule main peut souvent en tenir plusieurs, notamment stylo et micro (Fig. 4.3.i). Différents types de gestes bi-manuels ont pu être notés, par exemple pour inverser des strips ou reclasser deux stacks d'attente en même temps (Fig. 4.3.c,d). Nous avons cependant remarqué qu'une seule main est utilisée pour les actions à contrôler séquentiellement ou lorsque le contrôleur doit tenir le téléphone. Concernant la manipulation de strips, on observe souvent qu'elle peut impliquer plusieurs strips en même temps (Fig. 4.3.c,d,h,l), conduisant parfois aussi à des regroupements de strips (empilement par exemple). Enfin les gestes portent fréquemment sur le tableau de strips de l'autre contrôleur (Fig. 4.3.f.o).

En dehors des gestes ayant un caractère purement pratique et utilitaire, notamment ceux qui servent à déplacer un strip (gestes ergotiques), la plupart des autres gestes ont une fonction collaborative ou épistémique justifiée



FIGURE 4.3 – Typologie des gestes observés. a) geste « beat » pour soutenir une description de trajectoire, b) saisie d'un strip de l'imprimante, c,d) bi-manualité, e) geste déictique vers l'écran, f) écriture et désignation d'un strip, g) écriture avec maintien du strip par la main micro, h) geste épistémique pour réfléchir à une action potentielle sur 2 vols, i) plusieurs instruments dans la main, j) position de préparation/concentration, k) geste interactionnel pour indiquer une intention de communiquer, l) manipulation de plusieurs strips simultanément, m) léger soulèvement d'un strip pour désignation, n) pointage, o) double pointage.

par des besoins de sécurité : désigner un strip à un.e collègue, lui souligner un souci par emphase gestuelle, intervenir physiquement dans le champs visuel d'un.e collègue, voire aussi re-classer bi-manuellement des stacks d'attente avec un rythme particulier à caractère systématique, ces gestes participent d'une construction constante de la sécurité telle qu'elle se pratique effectivement [Mac99][DGM⁺01] [Hol14].

4.2.2 Cohérence et cognition distribuée dans un système de strips tangibles augmentés

L'importance des gestes effectifs des contrôleur.e.s pour la construction de la sécurité, ainsi que leur rôle dans le design du tableau de strips relève d'un point de vue des théories utilisées en IHM de la cognition distribuée telle que développée par Hollan, Hutchins et Kirsh [HHK00]. Strip'TIC est un système de strips électroniques papier connectés par code QR et stylo numérique à une position de contrôleur aérien. Dans ce système, développé par Christophe Hurter et Rémi Lesbordes, le strip est un mixte d'objet physique, une bande carton qu'on peut annoter, et d'un objet qu'on dira "virtuel", double numérique composé d'un affichage à l'identique projeté par en-dessous d'un tableau de strips translucide et d'affichage superposés au papier pour donner des informations dynamiques¹. Grâce à la technologie Anoto, les inscriptions des contrôleur.e.s, qu'elles soient manuscrites ou tracées sur le tableau translucide, sont communiquées au système, qui peut les interpréter et les intégrer aux affichages superposés. L'un des aspects les plus appréciés de ce système consiste dans l'intégration qu'il propose entre l'image radar, adressable également en Anoto, et le tableau de strips : désigner un strip ou une balise sur le tableau renvoie à son occurrence sur l'écran radar et inversement.

Une des questions que nous avons étudiée dans le cadre du projet Strip'TIC est celle du statut des externalisations physiques et virtuelles du choix des contrôleurs à leur égard, notamment par rapport à la gestion complexe du temps dans le contrôle aérien. Les développements actuels des systèmes ATC (voir [ica12] par exemple), fournissent des outils qui utilisent des informations temporelles pour gérer les trajectoires. Maestro [BHM⁺07] fournit aux contrôleurs de Roissy un outil permettant de calculer leurs séquences d'arrivée en fonction de créneaux horaires explicites. Nous avons cherché à savoir si l'augmentation pouvait fournir un support utile aux

1. voir [HLL⁺12a] pour une description détaillée de ce système

fonctionnalités liées au temps (voir annexe B.2).

Que représentent réellement les objets physiques (les strips) ?

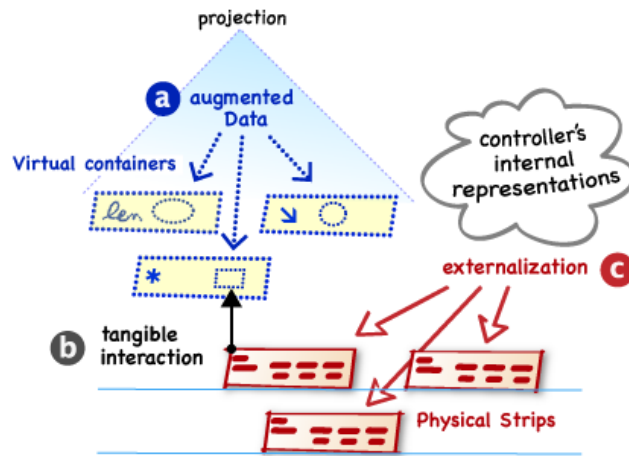


FIGURE 4.4 – Strips physiques (b) agissant comme des *contrôles* et comme des *conteneurs* pour les données augmentées (a) et comme *représentations* et *tokens* des éléments cognitifs (c).

Dans Strip’TIC, nous avons choisi une perspective d’interaction tangible pour analyser nos observations, complétant une perspective de papier augmenté. Comme le soutient Zuffery et al [ZJDL09], les interfaces papier peuvent être considérées comme des TUI (tangible user interfaces), car elles offrent aux utilisateurs une modalité d’interaction physique et proposent une correspondance étroite entre entrée et sortie. L’interaction tangible propose des modèles de conception visant la cohérence (e.g. [KBNR03]), et nous voulions évaluer la complexité de l’interaction mixte dans un contexte de système critique.

Comme l’ont remarqué Klemmer et al [KHT06], l’une des préoccupations dans le domaine des interfaces tangibles (TUI) est la représentativité d’un objet physique par rapport à un objet virtuel. Holmquist [HRL99] décrit ainsi les objets physiques comme représentant des objets numériques : alors qu’un conteneur représente potentiellement n’importe quel objet virtuel, un token tient lieu d’un objet virtuel effectif et spécifique. Dans cette approche,

la représentation physique joue à la fois le rôle d'un analogue et d'un signe, c'est-à-dire quelque chose qui tient lieu d'autre chose [UI00].

Lors de la conception de Strip'TIC, nous avons été confrontés à cette question de la représentation d'une manière différente (fig. 4.4). En effet, que représentent en réalité les strips papier physiques ? Dubey et al [DGM⁺01] soulignent l'aspect très "virtuel" du travail du contrôleur - non pas que les contrôleurs effectuent un travail "virtuel" ou quoi que ce soit de ce genre (pour peu que cela veuillent dire quelque chose) : ce dont il s'agit c'est d'un certain rapport avec le réel, comportant une dimension d'incertitude, avec ses aspects très positifs pour la sécurité d'autant qu'elle est le tissu du lien social entre les contrôleurs, tout autant qu'une mise à distance nécessaire. Dans ce cadre, les strips physiques représentent essentiellement les vols qui traversent leur secteur et la responsabilité qui y est associée, et non les strips virtuels, même si dans Strip'TIC les manipulations dans l'espace physique déclenchent des événements dans l'espace virtuel. Les strips "virtuels" quant à eux, projetés sous le tableau, servent principalement en fonctionnement nominal de feedback lorsque le strip papier est posé sur le tableau, notamment pour montrer qu'il est bien reconnu. En revanche, lors d'un dégroupement de position de contrôle, les strips virtuels restent affichés alors que les strips physiques sont déplacés sur un nouveau tableau, et durant cette phase, c'est le strip virtuel qui représente le strip physique en cours de déplacement. Le paradigme de Strip'TIC est donc la cognition distribuée, avec d'un point de vue technique plutôt des mécanismes de réalité augmentée spatiale que des interfaces tangibles (TUI). L'annexe B.4 reprend la partie de article qui détaille ces aspects [LHL⁺13].

4.2.3 Transduction et concrétisation dans le strip électronique

Le travail de conception mené autour du strip augmenté [HEG⁺11] [HLL⁺12a] [LHL⁺13] [VLL⁺14], cette bande de papier utilisée par les contrôleurs aérien pour gérer les avions traversant leur secteur, a développé ce qu'on peut décrire comme sa transductivité. Dans un article sur "la sécurité telle qu'elle se fait" [DGM⁺01], Dubey et al caractérisent la nature transductive du strip papier : il a une certaine efficacité technique en même temps qu'une grande efficacité symbolique et sociale. Il fait lien, il cimenter le collectif dans les situations de travail, contrairement aux nouveaux automatismes,

et ceci de manière implicite².

Le strip augmenté de Strip'TIC est connecté au système informatique par cinq canaux techniques : le stylo numérique pour le pointage et l'annotation manuscrite, le code QR pour la position sur le tableau, et la double projection par-dessous et par-dessus pour les informations dynamiques, le tactile pour la gestion de certaines configurations et l'interaction gestuelle (Kinect et Leap motion) pour les manipulations d'édition (copie de strip, archivage, etc.). Le strip augmenté est une évolution du strip papier vers plus de concrétisation. Il constitue une convergence harmonieuse et continue du numérique et du physique, à travers le stylo numérique qui à la fois écrit avec de l'encre et envoie les traits au système, jusqu'au mélange d'encre imprimée et de couleur projetée sur le papier [Vin14] ; il concentre également de multiples fonctions puisqu'il sert à la fois pour les fonctions du strip papier, pour renseigner le système numérique, et comme dispositif d'affichage déplaçable sur le tableau comme une fenêtre sur le bureau de l'ordinateur. A cet aspect pluri-fonctionnel s'ajoute la convergence fonctionnelle puisque les manipulations de l'objet physique servent à la fois à gérer cognitivement le trafic et les tâches à effectuer, et à interagir avec le système informatique [LHL⁺13].

4.3 Airtius : le danger des surfaces tactiles

Dans les années 1980, le concept du Glass Cockpit a radicalement changé les interfaces du poste de pilotage des avions commerciaux, en remplaçant des dizaines d'instruments mécaniques analogiques par un affichage numérique des informations du système de l'avion. Les données sont regroupées en unités fonctionnelles et affichées sur des écrans spécialisés, dédiés à chacune des principales activités de l'équipage. L'équipage interagit avec ces systèmes et ces données au moyen de contrôleurs physiques : boutons, interrupteurs, boutons à tirer ou bâtons. Ces dispositifs de contrôle physique finement réglés ont prouvé leur efficacité pour l'interaction pilote-système, la connaissance de la situation et le travail coopératif, même dans des contextes d'utilisation

2. Dubey et al citent un contrôleur qui explique l'effet de l'automatisation : "Donc si tu arrives sur le secteur et que tout est déjà étudié tu es obligé de te conformer à cette norme de classement. C'est plutôt ça qui gênerait les gens, le fait de se conformer à une seule norme. C'est ce à quoi, je pense, ils veulent arriver en se disant, comme ça il n'y aura plus de risque d'incompréhension, tout le monde fera pareil. Or tout le monde ne réfléchit pas de la même façon."

dégradés, tels que de mauvaises conditions de vol, l'instabilité, une vision dégradée (fumée), la fatigue du pilote, la charge cognitive ou le stress. Le projet Airtius, sur la base d'une constatation de menaces pour la sécurité dans la tactilisation (efficacité moindre, nécessité de concentration visuelle, inconfort postural et gestuel, fatigue, mauvaise utilisation des compétences liées à l'espace physique 3D, problème de conscience mutuelle, problèmes dans des contextes dégradés, stress ou charge cognitive des pilotes, faible feedback sensori-moteur et sentiment de perte de contrôle) [PLV⁺18], avait pour objectif technique d'explorer une approche mixte pour les contextes critiques, basée à la fois sur des écrans tactiles et des composants physiques (surfaces déformables, saillance, ...). Après une étude de l'activité permettant de comprendre les dimensions physiques de l'activité de pilotage (section 4.3.1), plusieurs prototypes de surfaces physicalisées ont été conçus (section 4.3.2).

4.3.1 Dimensions physiques de l'activité de pilotage

Le parti pris de cette étude, menées auprès de pilotes avec les méthodes classiques utilisées en IHM (13 h d'observation en vol et en simulateur, 15h d'entretiens contextuels avec une dizaine de pilotes, transcrits et analysés qualitativement)³, était, avant de physicaliser le tactile de bien comprendre la physicalité de l'activité actuelle, mais sans a priori sur les dimensions de cette physicalité. Des caractéristiques ont été analysées collaborativement en utilisant un codage qualitatif émergent s'inspirant de la grounded theory [CS90]. Nous en reportons quelques unes en annexe C.1 (voir [LVP⁺18] pour une description complète). Essentiellement, ces analyses montrent l'importance d'une perception instrumentée, l'environnement hors repères terrestres amenant à se méfier des illusions sensorielles (fig. 4.5.a). D'autre part, les pilotes technicisent leur activité physique de plusieurs manières : par un compte-rendu technique des capacités physiologiques, une conscience mécanisée des gestes pour rationaliser la perception, et l'utilisation de structures orales rythmiques pour garantir la complétude des procédures, la communication orale étant par ailleurs privilégiée comme modalité d'extériorisation.

Les théories utilisées en IHM peuvent fournir des éléments d'analyse pour ces d'observations, même s'il faut les adapter un peu. La cognition distribuée

3. voir le chapitre 6, et la section 6.1.2, et l'annexe E.1.7 pour des précisions sur le contexte et le déroulement du projet

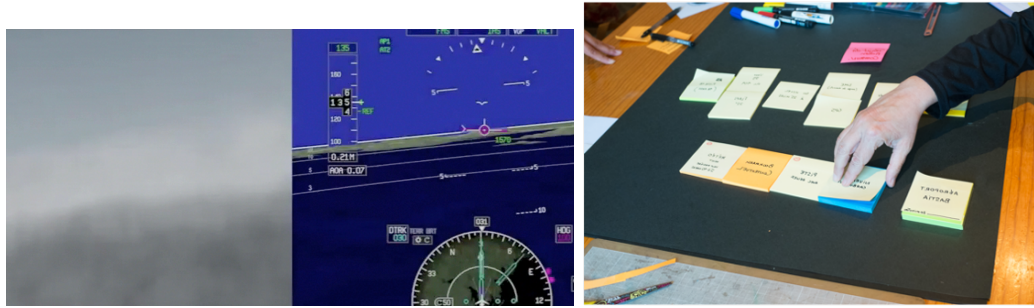


FIGURE 4.5 – Dimensions physiques de l'activité des pilotes. a) lecture sur un instrument préférable à la perception directe b) prototype de briefing tangible.

(en particulier avec Hutchins bien sûr qui en est un des fondateurs et qui a produit de magnifiques analyses de l'activité de pilotage [HK96]) permet de comprendre les actions d'externalisation, même si pour les pilotes ce sera parfois dans les échanges verbaux plus que dans l'espace physique, sous forme d'une *externalisation compressée*, faute de place et de temps - un pilote réagissait ainsi lors d'un atelier où nous avons évoqué l'idée d'un briefing tangible (fig. 4.5.b) : "Nous préférons une stratégie où vous dites : «Ok, quelque chose a changé. Vous faites une mise en attente»", exprimant que la parole était plus efficace pour cette étape temps réel.

Nous avons aussi fait appel à certains concepts de la phénoménologie, comme celui de synthèse corporelle [MP45], elle-même inspirée des notions de transparence [Hei27] et proche du principe de médiation incarnée [Ihd79], mais encore une fois, en l'adaptant pour l'activité des pilotes d'avion de ligne. Car si on y réfléchit, de quelle synthèse corporelle peut-on parler pour les pilotes ? C'est en conceptualisant un espace dual, constitué d'un espace proximal et d'un espace externe "étranger" que cette notion prend sens (fig. 4.6) [LVP⁺18]. L'espace proximal est l'espace intérieur du cockpit. C'est un espace de vie protégé qui peut être considéré comme une bulle, où les lois naturelles s'appliquent. A l'intérieur de cet espace proximal, l'accès perceptif et physique est direct. Il est encodé dans le corps du pilote par la connaissance approfondie de son lieu de travail et par des compétences résultant de procédures, de postures et de gestes constamment répétés : la main du pilote qui se pose automatiquement sur la commande appropriée, la coordination

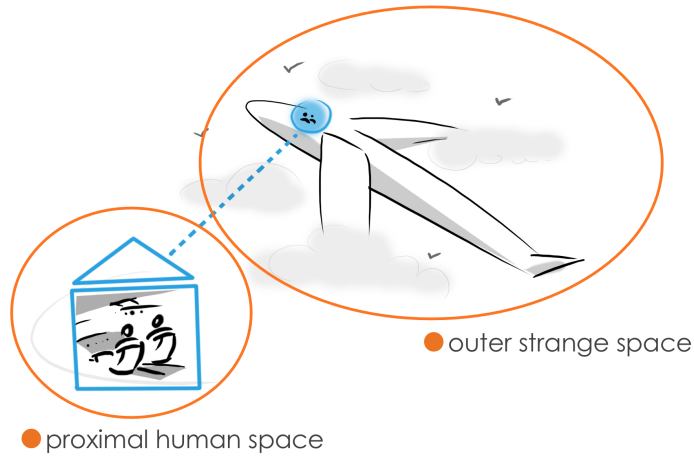


FIGURE 4.6 – Espace dual des pilotes : espace proximal, espace intersidéral

geste-regard qui traverse le poste de pilotage ou le travail de collaboration corporelle entre les membres de l'équipage. La deuxième partie de ce double espace incarné et perceptif est l'extérieur du cockpit. C'est lorsqu'ils sont sanglés sur leur siège aux commandes de vol, qu'il y a synthèse corporelle, et que les pilotes deviennent une extension de l'avion lui-même, tels des centaures, projetés à grande vitesse dans le ciel, dans un espace "non-humain". Dans ce monde égocentrique instable, les repères sont plus faibles, moins nombreux, mobiles, imprécis (cf. les masses nuageuses), sans mesure. Dans cet espace extérieur, seul l'accès visuel est possible, à distance, et, comme ils expérimentent facilement la désorientation spatiale, les pilotes ont tendance à se méfier de leur perception.

Implications pour la conception

Tenir compte de cet espace dual consiste ainsi d'une part à tenir compte des variantes aux thèmes de l'interaction tangible qu'il fallait envisager, notamment en situation de pilotage intensif, faisant intervenir la perception instrumentée, l'externalisation compressée, et où l'intervention de capteurs de type ambient ou ubiquitaire est assez peu recommandée, les pilotes souhaitant avoir la maîtrise explicite de leurs actions (fig. 4.7). Les contextes de vol évoluant vers des situations plus relâchée, comme la phase de croisière,

permettent de revenir à des techniques d'interactions plus "terriennes", incluant plus souvent du tactile notamment.

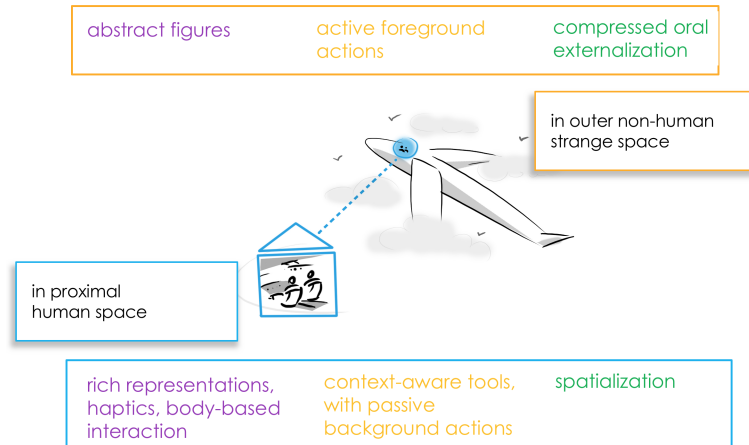


FIGURE 4.7 – Design dépendant du contexte et couplage

4.3.2 Design de prototypes

L'annexe E.1.7 donnant le détail du processus de design du projet Airtius, je me concentrerai ici sur une description brève des principaux prototypes conçus par le consortium, Gazeform et Multiplié, et sur la manière dont notamment les prototypes Multiplié ont été perçus par les pilotes de ligne participants au projet (section 4.3.3). Je conclurai cette section sur une analyse du concept (section 4.3.4).

Gazeform

Gazeform est une surface hybride, comportant des boutons à saillance dynamique et de l'interaction tactile (fig 4.8). Le principe est simple : lorsque le regard "touche" la surface (cela étant détecté par un système de suivi oculaire et des QR codes sur les côtés), la surface est tactile et les boutons sont aplatis, lorsque le regard quitte la surface, les boutons ressortent et peuvent être utilisés pour faire des réglages. L'article [PLV⁺18] décrit le système et les résultats d'une expérimentation contrôlée, résultats plutôt très positifs en termes d'allègement de l'activité visuelle et de la charge mentale pour

le système comparé à une version totalement tactile. La difficulté soulignée dans cette conception est la granularité et la position des contrôles physiques. Dans Gazeform, les trois boutons disponibles sont à une position fixe et de taille prédéterminée. Pour généraliser le concept, il faudrait imaginer une surface totalement émergeable avec des granularités variables, comme dans d'autres projets (e.g. [RCP⁺16][FLO⁺13]) qui n'ont pas cependant ce concept de saillance adaptée à la direction du regard. L'utilisation de matériaux programmables, d'essaims de mini-robots pour créer de la "matière moléculaire artificielle programmable" sont envisagés.



FIGURE 4.8 – GazeForm

Multiplié I et II

Comme décrit dans l'annexe E.1.7, les prototypes Multiplié (fig. 4.9) [PVL⁺19], instances du concept de surface pliable comme un accordéon (fig. E.7), ainsi que le concept lui-même, ont fait l'objet d'une longue élaboration, avec de nombreuses activités de design (ateliers collaboratifs), plusieurs mois de recherche des bons mécanismes, et quelques mois de mise-en-œuvre logicielle et matérielle.

Une des instances, Multiplié I, est composée de 4 petits écrans tactiles articulés et actionnés par des vérins, sur lesquels l'affichage se dispose selon le contexte comme dans des fenêtres (fig. 4.9.a,b). L'autre instance, Multiplié II, est une surface continue imprimée en 3D, pliable grâce à des vérins, dont une partie est tactilisée avec de l'encre conductive. L'affichage est réalisé par



FIGURE 4.9 – Multiplié-I (haut) et Multiplié-II (bas)

Scenarios	Shape Changes	
Prototype 1 : Articulated display series		
S1. Changing a heading at a waypoint upon reception of a message from ATC (Figure 1.c).	a. Tilting to notify a message	
	b. Easing input	
	c. Slight downward impulse every 10 values for feedback	
S2. Trajectory negotiation upon reception of ATC instruction (Figure 4.b).	a. Raising a fold to request action	
	b. Pilot realignment of 2 middle screens to interact with extended map	
S3. Browsing through ECAM system pages (figures 7.b, 7.c).	a. Slight upward impulse when browsing for feedback	
Prototype 2 : Pleated display surface		
S4. Running a checklist conditional steps or system reporting of a failed action (figures 9.b, 5.b).	a. Top fold for current checklist item. When associated task is completed, pilot depresses fold. Brief lowering of fold for feedback simultaneous scrolling to next highlighted item.	
S5. Managing a flight plan variant with approach constraints (figures 1.d, 7.a)	a. Raising a fold to warn of notable information at waypoints.	
	b. Pilot depresses series of folds, one by, one upon each action completion.	
	c. Flattening the area in front of the fold to display additional informations for a waypoint.	

FIGURE 4.10 – Scénarios réalisés sur Multiplié I et II

un projecteur qui s'adapte aux modulations de la forme. Les interactions ont été conçues en se concentrant sur cinq scénarios inspirés de l'analyse de l'activité et adapté au concept d'une structure pliable linéairement (fig. 4.10).

4.3.3 Evaluation



FIGURE 4.11 – Retours qualitatifs : a,b : stabilisation de la main, c : plasticité du principe, d : structuration écologique

Les retours qualitatifs des pilotes ont été recueillis lors de quatre séances de type walkthrough où les scénarios étaient joués par des pilotes, et où ils pouvaient commenter, interpréter librement les dispositifs, ou même brainstormer sur d'autres possibilités. Ces séances ont été transcrites et analysées.

Il s'agissait de la première présentation du concept à des pilotes, ces derniers n'ayant pas participé à la conception de l'idée. Le concept a été largement validé par tous les pilotes, certains souhaitant même aller plus loin dans la plasticité (fig. 4.11.c,d). Les résultats significatifs de ces séances sont résumés en annexe C.2 [PVL⁺19]. Ils révèlent une importance inattendue de l'efficacité visuelle de la saillance, de la plasticité potentielle des dispositifs (fig. 4.11.c), et de la structuration linéaire permettant une perception

écologique des informations (fig. 4.11.d), et bien sûr les avantages attendus pour la stabilité de la main (fig. 4.11.a,b).

Une expérimentation contrôlée a été réalisée sur un simulateur 6 axes reproduisant différents niveaux de turbulences [CVL⁺21]. Les résultats confirment l'impact des turbulences. Les résultats ont aussi montré que le fait de disposer de plis permettait une réduction de l'effort physique en stabilisant le bras et la main. Cette physicalité était également associée à de meilleures performances de pilotage, ainsi qu'à une meilleure conscience de l'état des systèmes de l'avion, certainement parce que les formes offertes par les plis présentaient de meilleures propriétés visuelles.

4.3.4 Analyse du concept

Je résume ici les caractéristiques du concept de Multiplié, entendant bien par là ce que dans la théorie des quatre causes Aristote entendait par eidos (section 2.5.4 du chapitre 2), par opposition à sa forme apparente (morphè), et ce même si ces caractéristiques reposent en grande partie sur cette forme physique.

Développement continu de surface. Le concept de surface pliable correspond à la fois à une surface, qui reste une surface même pliée, et à de l'émergence d'éléments, les plis, bien que le pli reste en continuité avec la surface. Le pli est en effet un élément saillant, tout en restant une partie de la surface elle-même, un écran interactif, constamment accessible de manière visuelle, tactile et tangible, sur les deux faces du pli. Par rapport aux acceptions familières des surfaces, considérées comme des frontières sans épaisseur, simple enveloppes d'objets ou transition entre états de la matière [Str88], le pli apporte une physicalité structurelle. De plus, les plis sont formés par des mouvements continus d'une structure sans couture, sans positions discrètes. Un pli est donc aussi comme un état de la surface.

Intelligibilité de la structure. Une autre dimension importante réside dans la lisibilité du concept, qui découle de sa familiarité mais aussi de sa régularité. Les propriétés qui soutiennent cette régularité peuvent être décrites à deux niveaux : la structure supérieure impliquant plusieurs plis comme un ensemble cohérent, et le pli lui-même. La structure présente des contraintes qui la rendent plus prévisible qu'une surface pliable dans n'im-

porte quelle direction. Ici, la structure est linéaire, les plis sont parallèles et les bords sont alignés. Il en résulte une structure qui offre un ensemble d'éléments réguliers. En formant un ou plusieurs plis alignés sur la surface flexible, le dispositif fournit également une nouvelle variable visuelle [Ber77], la forme physique, le pli, (associée à son mouvement), pouvant coder de l'information. En utilisant les caractéristiques de Bertin, nous pouvons dire que cette variable est sélective et permet une vision pré-attentive, observée par les pilotes. Les plis permettent également des reconfigurations par l'utilisateur, comme l'utilisation d'une séquence de plis ou le soulèvement d'éléments d'intérêt à des fins de programmation.

Généricité du concept. En raison de sa généralité, le concept comporte des variantes sur plusieurs dimensions. Cette flexibilité offre un large espace de conception, sans réduire l'intelligibilité du concept. Les variations concernent principalement les angles, l'échelle, l'homogénéité des hauteurs et des longueurs des plis. La diversité des échelles permet des propriétés différentes : les petits plis produisent un état de surface (par exemple, une rugosité), tandis que les grands plis peuvent former une série d'écrans d'affichage.

Médiations incarnée et herméneutique. La surface possède de bonnes propriétés physiques : étant donné la taille des plis, un pli peut correspondre à la taille de la main pour la saisie ou la calage. Les plis peuvent également correspondre à la taille du bout du doigt, où un ensemble de plis minuscules peut procurer une sensation de texture. La structure est également alignée sur les compétences incarnées qui sont typiques des activités en temps réel réalisées dans un contexte stressant et exigeant, et qui sont acquises par l'entraînement. Ces compétences reposent notamment sur la connaissance spatiale et l'utilisation de structures rythmiques. À cet égard, la régularité de l'ensemble des plis produit à la fois un support de localisation spatiale et un cadre temporel pour des interactions séquentielles répétées. Ces aspects vont dans le sens d'une possible synthèse corporelle avec l'environnement instrumental de l'avion (voir section 4.3.1).

La saillance visuelle est à la fois analysable comme permettant une médiation incarnée par la Gestalt et le caractère sélectif de la forme, en faisant intervenir la vision périphérique et en faisant percevoir "en 3D" dans l'espace physique en plus de la représentation graphique, mais l'idée est de

faire passer de cette perception incarnée à une interprétation de ce qui est affiché, et donc à une relation herméneutique qui représente un état de la réalité qu'il faut interpréter. Lorsque que tout redevient plat, on repasse en mode incarné. La structuration, le rythme visent une relation incarnée, avec la possibilité de se situer rapidement dans un repère physique et corporel (correspondance entre taille des plis et de la main).

Transduction et concrétisation dans Multiplié I et II. Une première catégorie de transductivité est entre les structures d'externalisation de l'activité de pilotage et la propriété "rythmique", largement approuvée par les pilotes qui voyaient dans le concept une idée de "séquenceur" analogue aux séquences verbales resserrées, témoin également de ce Simondon dénommait des modes communs entre humain et objet technique (section 2.7.3). Une autre analogie analysable est celle de "vague", vague avant, vague arrière, traduisant sans doute par là une image de flux temporel central dans l'activité (et étroitement associé aux flux d'énergie, l'un pouvant mesurer l'autre et réciproquement). On a vu également la transductivité du concept au plan collaboratif (annexe C.2), en construisant la conscience mutuelle de l'état de l'avion et des tâches à anticiper, à l'égal du strip pour les contrôleurs aériens (section 4.2.3).

Multiplié est encore objet technique abstrait, avec un concept dont la concrétisation n'est pas entièrement réalisée - le fait qu'il y ait deux prototypes en est un symptôme. Il constitue une étape pour une convergence de deux lignées, celle des compositions d'écrans multiples, et celle des surfaces flexibles à transformation de forme. Les éléments d'intégration potentiels se situent :

1. au niveau des mécanismes actuateurs du mouvement des surfaces qui dans Multiplié I et II sont assez similaires (actuation par des petits vérins),
2. au niveau de l'affichage par projection interne ou externe (une convergence serait de pouvoir imprimer des éléments d'affichage),
3. au niveau de la flexibilité de fabrication, importante avec l'impression 3D, qui pourrait se retrouver dans le principe de composition modulable de petits écrans tactiles,
4. au niveau du mécanisme de charnière, rendu possible dans Multiplié II par l'insertion de rainures dans la surface souple, alors que dans Mul-

Multiplié I un espace entre les écrans s'ouvre quand deux écrans forment un pli,

5. au niveau de la tactilisation possible grâce à la compatibilité de l'imprimante avec une encre conductive pour Multiplié II.

Enfin Multiplié, sur le plan de l'individuation, témoigne de l'importance d'une marge d'indétermination dans l'objet technique, dont la métastabilité *par design* est un potentiel, parce que, de par sa nature "non fonctionnelle", c'est-à-dire non déterminée uniquement par des besoins fonctionnels, elle permet des variations dans l'objet et des adaptations au contexte.

4.4 Discussion

4.4.1 Tangibilité et information

Comme l'analyse Dubey dans un article intitulé "Toucher le virtuel : une nouvelle anthropologie." [Dub13], l'apparition des problématiques de tangibilité doit d'abord être replacée dans le contexte du processus d'automatisation dont il constitue l'une des dernières retombées. Tactile et automatisme sont en effet comparables comme deux formes de "déprises" : une surface tactile qui redonne prise, c'est analogue à un automatisme qui redonne la main, presque au sens propre, en faisant émerger une forme saisissable. Le flat cockpit, c'est celui qui est géré : à part du monitoring, il n'y a rien à "faire". L'interaction "glisse" sur la surface pour de la visualisation, pas pour de l'action. Plus généralement, amputé de ses références au toucher, au goût, à l'odorat, le champ de l'expérience sensible se serait inexorablement rétréci et, avec lui, le sentiment d'appartenance au monde (Illich, 2004 ; Le Breton, 1999 ; Heller-Roazen, 2007). Or, remarque Dubey, force est en effet de constater que le corps, loin d'être le grand absent, se trouve au contraire au centre des préoccupations des concepteurs de technologies et de leurs utilisateurs. « L'obsession technologique du siècle débutant est haptique (du grec haptin : « toucher »). À la différence du vieux projet d'intelligence artificielle, où il s'agissait de recréer la vie par d'autres moyens que ceux de la vie, la recherche de tangibilité tend à montrer qu'*il n'y a d'objets techniques qu'incarnés dans une relation*». Est ainsi introduite "une discontinuité majeure avec la phase analogique antérieure dans laquelle, par le biais des différentes sensations et des retours d'effort, l'opérateur se trouvait de plain-pied dans la réalité". Comme l'explique Baudrillard [Bau68] :

À la préhension des objets qui intéressait tout le corps se sont substitués le contact (main ou pied) et le contrôle (regard, parfois ouïe) [...] Tous les objets modernes se veulent d'abord maniables. Mais quelle est cette main en fonction de laquelle leurs formes se profilent ? Ce n'est plus du tout l'organe de préhension où aboutit l'effort, ce n'est plus que le signe abstrait de leur maniabilité [...] Le corps humain ne délègue plus que les signes de sa présence aux objets dont le fonctionnement est par ailleurs autonome.

Les études du CETCOPA de l'université de Paris 1 [GMPDS91][GMPDS95] menées durant une trentaine d'années ont montré comment les opérateurs de première ligne en aéronautique durent ainsi apprendre à renoncer partiellement à ce qu'ils avaient toujours appris à faire. « L'intelligence » embarquée dans les objets (les algorithmes) avait rendu accessoires certaines formes de collaboration entre l'homme et la machine. La communication des systèmes et sous-systèmes entre eux, souvent à l'insu des pilotes, excluait en particulier ce type de complémentarité. Les objets, conçus dans un esprit de perfection pour être autonomes et pour fonctionner en vase clos, devenaient de moins en moins perfectibles par l'usage. L'avertissement lancé par Gilbert Simondon, selon lequel l'indétermination des objets techniques était la condition pour que ceux-ci fassent monde avec des êtres humains, semblait ne pas avoir été entendu [Sim58]. Or, et cela prolonge l'analyse de Dourish [Dou01], le rapport au monde n'est pas un rapport seulement à l'information : "ce que les sciences humaines savaient d'une certaine manière depuis longtemps, à savoir que les êtres humains ne se rapportent pas à leur environnement à la manière dont les computers traitent de l'information. Ils produisent des significations de celui-ci, en fonction d'une expérience pluridimensionnelle, marquée par un ancrage à la fois social, historique et corporel (Merleau-Ponty, Strauss, Mauss mais également Durkheim dans le cadre du concept de morphologie sociale)".

L'interaction tangible est bien une façon d'interroger les compatibilités entre l'humain et le numérique [Sti16]. Or, comme le suggère Dubey, le désir de tangibilité, par le biais d'artifices et d'effets de réel, peut apparaître comme un moyen de masquer ou de maquiller la réalité du développement vers l'automatisation et les algorithmes, c'est-à-dire la réalité d'une perte de contrôle progressive par les êtres humains de leur environnement immédiat au profit de dispositifs de contrôle de plus en plus complexes. Si tant Strip'TIC que Multiplié présentent des avantages indéniables pour des opérateurs experts

de haut niveau ayant à gérer des situations potentiellement complexes, et surtout vitales, en temps réel, comment faire évoluer leurs principes de conception tangible et incarnée dans un sens qui soit compatible avec l'évolution des systèmes interactifs? Il semble tout aussi fondamental de continuer à penser la matérialité des systèmes interactifs, que de penser le tangible dans le cadre du contrôle humain et social des systèmes techniques - que ce soit du point de vue algorithmique ou systémique, approche qui existe en intelligence artificielle avec le concept HAT (Human Automatism Teaming) (en aéronautique cf [Pin21]) et l'explorable AI (e.g. [WYAL19] en design).

4.4.2 Tangibilité et valeurs : sécurité, sens et écologie

Les projets Strip'TIC et Airtius illustrent l'importance et l'efficacité dans un domaine comme la sécurité aérienne d'une prise en considération des possibilités perceptives, sensori-motrice, expressives, collaboratives qu'offre un système conçu selon les principes de la conception tangible, tels qu'ils sont décrits notamment par Hornecker [HB06] ou Ullmer & Ishii [UI00].

Ces projets apportent également du sens dans les activités de conception, ne serait-ce que par la nécessité pour réaliser une bonne conception d'acquiescer une compréhension aussi fine et aussi riche que possible de l'activité, en employant des méthodes favorisant la créativité et l'invention. Les prototypes conçus sont un sujet de fierté pour l'équipe de design, et sont un aboutissement très satisfaisant intellectuellement car ils sont une incarnation *suffisante* pour une preuve de concept dans un premier cycle de prototypage. Ces projets sont aussi l'occasion de défis techniques, qui ouvrent des perspectives sur les possibilités d'interaction avec les systèmes informatiques.

Il n'est toutefois pas impossible que le paradigme de l'interaction tangible, qui a bien une vingtaine d'années, apparaisse bientôt comme un âge romantique de l'IHM, celui du sens d'un monde ré-approprié mais déjà dépassé par une évolution technologique et industrielle qui va le détruire. Regardons simplement la prolifération d'objets et de dispositifs qu'implique la tangibilisation numérique et confrontons cela aux bilans carbone du numérique : presque 40% de ce bilan est le fait de la fabrication des dispositifs. Ne serait-il pas plutôt souhaitable aujourd'hui de reconstruire du sens technologique, continuant certes à prendre en compte la perception et l'action humaines, mais en intégrant aussi la dimension complexe de systèmes socio-techniques s'incarnant dans un environnement aux ressources limitées? C'est cet aspect que j'essaierai d'aborder dans le chapitre 7.

4.5 Résumé

Dans ce chapitre, le thème central est celui de l'interaction tangible pour la sécurité aérienne. Après un résumé des principes de la sécurité "telle qu'elle se fait", et des principes généraux qui y correspondent, deux projets de systèmes aéronautiques tangibles ont été présentés, Strip'TIC et Airtius. L'accent a été mis sur les dimensions matérielles des projets. Dans Strip'TIC, ce qui est souligné c'est la structure cognitive d'un espace reposant sur l'externalisation (gestes, strips, tableau, positions des contrôleurs), au sein de laquelle les relations de représentation nécessitaient une clarification (4.2.2). La description d'Airtius s'attache à relier la compréhension des dimensions physiques de l'activité et de la structure très particulière de l'espace physique du cockpit avec les principes de conception de deux prototypes GazeForm et Multiplié. Une analyse de la concrétisation, inspirée de Simondon, est proposée pour Strip'TIC (4.2.3) et Multiplié (4.3.4). Le chapitre se conclut par une discussion sur le désir de tangibilité provoqué par la volonté de contrôle (de prendre la main dans les deux sens du terme) face à l'automatisation croissante qu'on observe dans l'ATC et le cockpit, et un sur les valeurs en débat dans le domaine du tangible, entre sens [Dou01], sécurité et écologie.

Chapitre 5

Voir l'interaction

Après avoir décrit et discuté la "matérialité" de l'interaction à travers les individuations issues de l'écriture numérique et des surfaces physicalisées, ce chapitre aborde la question de l'interaction comme un objet à percevoir. Il s'agit donc encore d'une approche de l'interaction comme un élément "tangibile". Les deux projets qui sont décrits dans ce chapitre correspondent aux travaux de thèse de Valentin Becquet qui a soutenu sa thèse sur la représentation des gestes tactiles en décembre 2019 (section 5.1), et de Maxime Bardou qui a commencé sa thèse en octobre 2020 sur le problème de la conscience de la situation dans le contexte du Single Pilot Operation (SPO) (section 5.2). La situation collaborative de ces deux projets est différente, puisqu'il s'agit dans le premier cas d'une situation co-localisée dans un cockpit d'avion de ligne, alors que les pilotes sont à distance dans le cas du SPO, l'un à bord et l'autre au sol, mais dans les deux cas la problématique est celle pour chacun des opérateurs de percevoir l'interaction chez l'autre.

5.1 Le geste matériel dans le cockpit

L'intitulé initial de la thèse proposée à Valentin Becquet était : "Le geste matériel, application au domaine aéronautique (cockpit)". La problématique, comme celle du projet AIRTIUS (voir section 4.3), est celle des limites des techniques d'interaction tactiles envisagées à moyen terme pour les instruments du cockpit. A l'inverse des gestes physiques, les gestes numériques s'avèrent limités en termes de contrôle réel par des abstractions difficiles à percevoir par l'utilisateur, et ce notamment en situation collaborative co-

localisée. En parallèle du projet AIRTIUS, le travail proposé était d'explorer un concept de geste "matériel", par une réflexion sur les rapports entre geste et numérique. Cette thèse était co-encadrée avec Xavier Guchet (UTC), professeur de philosophie spécialisé en philosophie de la technique.

5.1.1 Statuts du geste matériel

Le geste matériel comme une question de contrôle Ce qui caractérise le geste numérique, et qui le différencie du geste non numérique, n'est pas seulement son conditionnement par les possibilités techniques, puisque c'est le cas de tous les gestes techniques, mais surtout le fait que ce conditionnement est complexe voire abstrait d'un point de vue perceptif. Le qualificatif de "naturel" souvent associé à ce type d'interaction est assez difficile à justifier : même s'ils reposent sur une action physique, et même s'ils s'inspirent de gestes existants, on voit bien en effet que la syntaxe et la sémantique des gestes, c'est-à-dire l'effet qu'ils vont produire, et la manière dont ils doivent le produire, ne sont réellement compréhensibles et maîtrisables que si on connaît les chaînes opératoires des interprétations et réactions informatiques (cf Belloti et al [BBE⁺02]) sur la complexité sémantique des environnements interactifs à base de capteurs). Bien qu'il soit présenté comme "naturel", l'espace conceptuel de ces nouveaux gestes n'est donc pas si simple. Ce que nous proposons dans cette thèse c'est à la fois une réflexion fondamentale sur les rapports du geste et du numérique, et une exploration de conception technique à vocation d'expérimentation et d'inspiration pour cette réflexion, dans le contexte d'un projet qui se donne pour objectif d'explorer les technologies qui permettent de tirer profit des capacités perceptives des pilotes et des propriétés positives de l'espace et des objets physiques. L'importance de la dimension physique des interactions dans le cockpit, et la disparition progressive de cette dimension, ont été soulignés notamment par l'étude de Dubey et al [Dub13], comme l'observation de "[ce] geste qui avait un sens sur un avion classique, celui de contrôler au toucher la poussée des moteurs, se maintenait par habitude car sans doute sa main continuait-elle de chercher cette information qui lui était désormais refusée". S'il est pertinent de s'interroger sur le geste dans le cadre du cockpit, c'est pour deux raisons essentielles. D'une part, la progressive dématérialisation du cockpit amène aujourd'hui à envisager à moyen terme une solution d'écran unique tactile pour les instruments de navigation (Navigation Display), de gestion de la mission, voire également de pilotage (Primary Flight Display). Le choix du tactile, d'une

certaine manière, impose l'interaction gestuelle, de manière minimale (gestes déictiques de pointage) ou plus élaborée (gestes sémiotiques ou ergotiques pour activer une fonction ou manipuler une représentation graphique).

L'état de l'art actuel de l'interaction gestuelle permet assez mal de répondre aux contraintes et aux exigences en aéronautique, du fait d'une prise en considération à notre avis encore trop approximative des problèmes théoriques associés au geste technique. Pour mieux fonder les possibilités techniques en plein développement des gestes numériques sur une compréhension adéquate, la littérature fait appel à un certain nombre de travaux décrivant et classifiant les divers types de gestes, leurs fonctions, voire analysant leur dimension langagière, en y cherchant une validation en amont des gestes conçus artificiellement. Cette démarche est importante, mais, même si ce type de classification intègre la dimension numérique de manière explicite, par exemple à travers une classification des gestes utilisés en interaction homme-machine (e.g [Karam et al 2005]), la dimension numérique est rarement analysée comme telle, c'est-à-dire en essayant de comprendre ce qui fait problème. A travers ces classifications, ce qui apparaît, c'est en réalité l'idée que le langage du corps constitue un vivier potentiel de gestes de commandes dans lequel on peut puiser, et qu'il « suffit » d'adapter à un système numérique pour obtenir un "langage gestuel" [Cha08]. On se retrouve ainsi avec une problématique d'adaptation réciproque entre machine et corps, en considérant cette adaptation comme une question d'ergonomie (de confort) ou d'utilisabilité (clarté sémantique, etc).

L'hypothèse que nous avons proposé d'explorer c'est d'analyser non pas seulement les capacités gestuelles, que ce soit en terme d'information, d'expressivité ou d'effectivité sur le réel, ni seulement non plus les rapports de complémentarité entre geste et langage comme dans une approche multimodale, mais le rapport fondamental entre geste et technique. En effet, les rapports du gestuel et du technique ont fait l'objet de travaux importants, notamment en anthropologie. On peut, en effet, à l'instar de Leroi-Gourhan, analyser le geste technique comme d'abord issu de l'évolution des interactions entre geste et parole, où les couples main-outil et organes faciaux-langage ont commencé par un égal engagement dans la construction des symboles de communication, mais où le rôle de la main a été progressivement transféré de la manipulation, au simple déclencheur voire à un pur signal symbolique [LG65], résultant en un simple geste de contrôle [Bau68]. Karam et al [Km05] notent ainsi la prédominance de gestes de style sémaphorique - ou sémiotique - dans la littérature, alors que assez peu d'interactions gestuelles humaines

sont de ce type. En réalité, le "geste" semble s'être déplacé, puisque cette histoire a mené à un transfert progressif du geste hors du corps, d'abord dans l'outil, puis dans la machine, et, comme le dit Simondon [Sim58] : « La machine est un geste humain déposé, fixé, devenu stéréotypé et pouvoir de recommencement. ». Cette histoire aboutit aujourd'hui à une situation étrange où c'est bien pourtant quelque chose de physique qui revient avec le geste numérique, parfois même de manière assez complexe, mais selon des modalités de fonctionnement qui n'ont plus rien à voir avec l'interaction initiale geste-symbole, puisque le véritable geste technique et les composantes symboliques sont en réalité transférés dans la machine. Ainsi, alors que l'articulation geste/symbole, qui a toujours participé au développement technique, pouvait se comprendre avec Leroi-Gourhan comme la mise en oeuvre ouverte de chaînes opératoires laissant la place à la confrontation et à l'indétermination, cette articulation revient donc aujourd'hui plus ou moins à un choix de possibilités de "pantomimes sémaphoriques" non pas disponibles chez l'utilisateur, mais anticipées dans une machine. Le problème est donc, à partir de cette analyse, de savoir s'il est possible de surmonter ce blocage : qu'en est-il aujourd'hui d'une articulation du geste numérique - avec la codification numérique associée - et activité cognitive de l'utilisateur ?

Le geste matériel comme un problème de codage Une première approche pour explorer cette hypothèse pouvait être celle d'un problème d'articulation symbolique entre codification numérique et activité cognitive de l'utilisateur. Que deviennent en effet les distinctions entre gestes déictiques ou symboliques (aussi appelés sémiotiques ou sémaphoriques), gestes expressifs (iconiques, pantomimiques, rythmiques, etc.) et gestes de manipulation (ergotiques) dans un environnement où la sémantique du geste passera de toutes façons par une interprétation encodée dans un algorithme, c'est-à-dire de niveau symbolique ? Pour citer à nouveau Simondon, quelle communauté peut-on en attendre : "Le couplage de l'homme à la machine commence à exister à partir du moment où un codage commun aux deux mémoires peut-être découvert, afin que l'on puisse réaliser une convertibilité partielle de l'une à l'autre, pour qu'une synergie soit possible" ? Cette question indique la voie d'une appropriation possible : le geste peut être le vecteur de l'appropriation de la technique par l'homme dans la mesure où il permet à l'individu de donner à la technique une signification qui lui est propre [Cha08].

Le geste matériel comme toucher Une deuxième approche pour comprendre les rapports fondamentaux entre geste et technique est celle du geste perceptif (le geste épistémique de Cadoz [Cad92], ou tout simplement le toucher), et plus généralement du geste dans son rapport aux objets. D'une part, le toucher est important, concrètement, en tant qu'il est concerné par l'interaction haptique sur un mode relativement matériel : si effectuer un geste numérique c'est activer un algorithme, recevoir un signal haptique n'est en revanche pas une "sensation binaire". C'est le cas aussi pour les modes visuels et auditifs, mais le toucher concerne, lui, à la fois, et même simultanément, l'entrée (par le geste) et la sortie. C'est le cas par exemple pour ce pilote de Rafale à propos du manche qui s'il sert en entrée, renvoie aussi des informations importantes : "Quand quelqu'un vient dans le cockpit, j'ai l'air de ne rien faire, mais la jambe est croisée, et les mollets et la cheville sentent les mouvements du manche" [DM06]. Mais le toucher est une question fondamentale aussi du fait que, de par sa réflexivité, il permet de comprendre le rapport entre gestes et objets, par une « saisie des coexistences » qui lui est propre [MP64]. Il est aisé de constater que l'interaction sur surface "tactile" n'utilise que très peu voire même pas du tout le sens du toucher ; mais on peut aussitôt ajouter que bien qu'elle fonctionne par contact, ce ne sont pas des objets qu'elle permet de manipuler ni même d'atteindre, puisqu'elle ne donne accès qu'à des représentations plates, le seul "objet physique" intervenant dans l'interaction étant une surface lisse. Sur le plan technologique, l'interaction tangible tente d'améliorer la situation en faisant reposer le geste sur la manipulation d'un objet, utilisant ainsi mieux la richesse des relations entre geste, toucher et objets principalement sous la forme du geste de saisie, d'enveloppement, mais aussi parfois sous la forme de geste plus adaptés à la forme de l'objet, comme nous avons pu l'observer dans un projet de conception de gestes pour les strips des contrôleurs aériens [GMD⁺14]. Un autre type d'approche consiste d'ailleurs à "tactiliser" des surfaces non plates, c'est-à-dire des surfaces d'objets [Bau 2012]. La "graspability" [Fit96] [vdHM11] en est même un des concepts fondateurs, et le thème de l'interaction gestuelle tangible [ALvdH⁺15] a récemment émergé tout naturellement de cette relation fondamentale. Ce qui fait le lien entre toucher et objets, ce n'est pas seulement le contact. Si Baudrillard voit dans le geste d'enveloppement caractéristique des utilisateurs de smartphone (ou de briquets) un pur signe abstrait de maniabilité (maniable étant synonyme de fonctionnel), Charrié estime toutefois que l'objet constitue le support principal du geste, et observe d'ailleurs que disparition des objets et automatisation vont de

pair [Cha08]. Rémusat, il y a plus longtemps, dans un essai sur la matière [Sim42], proposait de comprendre qu'”entre les objets et nous, le toucher jette un pont sur l'abîme”, et que, ”en tant qu'ils sont touchés, les corps prennent le nom d'objets”. Cette affirmation du lien entre le toucher et les objets est d'ailleurs étendue par Jeanne-Marie Roux à notre environnement plus global, où le toucher n'est plus seulement celui de la main, mais aussi celui du corps en contact avec le sol ou le siège sur lequel nous sommes assis [Rou12], et cette généralisation intéresse tout particulièrement à la fois le cockpit avec son organisation spatiale particulière, et le projet AIRTIUS qui adresse tout autant la possibilité des objets tangibles (TUIs) que des supports plus importants, comme le large écran unique vers lequel vont les recherches actuelles [BDB⁺12]. On peut d'ailleurs faire l'hypothèse que si cette dimension objectale du toucher concerne la matérialité et la physicalité du geste, c'est parce que le corps, comme paradigme de l'extériorité, est aussi le paradigme de l'objet technique [Rib11]. Comme le dit Marcel Mauss, « Le corps est le premier et le plus naturel instrument de l'homme. Ou plus exactement, sans parler d'instrument, le premier et le plus naturel objet technique - et en même temps moyen technique - de l'homme, c'est son corps. » [M36]. La réflexion sur le geste matériel gagnerait ainsi probablement à une analyse conjointe du toucher réflexif, du corps technicisé et de la notion d'objet.

Le geste matériel comme effet sur le réel Une troisième perspective concerne le geste en tant qu'il modifie le réel. Ce que peut en effet apporter une meilleure compréhension du rapport entre geste et technique à travers le toucher et son rapport aux objets est en particulier la possibilité de pousser l'exploration de la dimension ergotique, dimension de manipulation et de modification des objets. Pour Cadoz, ce type de geste, qui, transposé à l'interaction homme-machine devient selon lui geste instrumental, est informationnellement efficace du fait de sa matérialité : ”C'est parce qu'il est matériel, fondé sur un échange énergétique contraint par des spécificités dynamiques, morphologiques, articulatoires qu'il atteint de telles performances expressives.” [Cad92]. Ces gestes, qui « combinent la vivante énergie manipulatrice et l'efficacité percutante des instruments programmés » [Gué95], offrent une piste de recherche pour penser la transition énergie-symbole.

Le geste matériel comme un soutien pour la collaboration Une autre approche pour analyser le lien entre geste et technique, qui celle qu'aura

adopté Valentin Becquet, est celle de la représentation graphique du geste, ici pour soutenir la conscience mutuelle entre les pilotes.

- comme un problème de codage : quoi coder et avec quelles variables dans la représentation graphique ? (du codage informatique au codage graphique et recherche d'un codage commun entre pilotes, passant par le geste)
- geste comme toucher : comment identifier et communiquer les dimensions incarnées du geste ? (et le corps comme objet technique)
- geste et effet du geste : transmettre l'effet du geste ou l'effet sur le système avionique ?

5.1.2 Problématique du geste tactile pour la collaboration

Un avion de ligne est généralement exploité par un équipage de deux pilotes : l'un, le commandant de bord (Pilot-In-Command, PIC), est le capitaine, tandis que l'autre est le copilote (First Officer, FO). Indépendamment de ces statuts, l'un et l'autre peuvent tout à tour prendre le rôle de Pilot Flying (PF) et de Pilot Monitoring (PM). Le cockpit est un environnement spécifique où toutes les actions visant à modifier les fonctions du système avionique sont distribuées et accessibles à l'équipage du pilote par les gestes et la vision [HK96]. Cette accessibilité est obtenue soit par des informations redondantes, soit par une ergonomie spatiale qui rassemble les commandes physiques au centre du cockpit. Dans le domaine de l'aéronautique, la conscience mutuelle est atteinte lorsque le PF et le PM sont capables de comprendre pleinement le comportement et les intentions de l'autre, en particulier dans des contextes dégradés [SSW⁺17]. Les gestes des pilotes contribuent pleinement à la conscience mutuelle par la forme et la dynamique de leurs mouvements.

Caractérisation des gestes des pilotes

L'objectif d'une étude préalable menée par Valentin Becquet en s'appuyant sur des observations a permis de caractériser finement ces gestes très particuliers que sont ces gestes des pilotes. Plusieurs dimensions ont été analysées, et il convient d'en mesurer l'importance par rapport à la problématique de l'interaction tactile. Ces dimensions sont résumées dans l'annexe D.1.

Limitations des gestes tactiles pour le cockpit.

Au regard de cette caractérisation, on peut craindre un certain nombre de limites des gestes tactiles par rapport à l'objectif de conscience mutuelle entre les pilotes. Les gestes tactiles semblent en effet moins compréhensibles que les gestes effectués sur des commandes physiques [BID09][CM04]. L'affichage sur une surface lisse et la perte de la perception tactile obligent en effet les pilotes à augmenter leur attention visuelle [PLV⁺18]. Ensuite, les gestes possibles sont limités par les conditions de vol, notamment les turbulences [CGP⁺17] [HGBS15], la fatigue du corps [BWM13] ou l'effet de la gravité [HAR16]. Enfin, l'affichage dynamique des interfaces tactiles, contrairement aux commandes distribuées statiquement dans le cockpit [HK96], réduit considérablement la compréhension des actions de l'autre pilote, nécessitant une double vérification que l'interaction est associée aux bons objets affichés.

5.1.3 Révéler les interactions par des représentations graphiques

Compte tenu de ces limitations, Valentin Becquet a proposé une approche visant à compléter les propriétés des gestes physiques existants par des représentations graphiques qui fourniraient des informations équivalentes et suffisantes pour la conscience mutuelle [BLVP19]. Valentin Becquet a réalisé une exploration conceptuelle basée sur l'analyse des gestes des pilotes, et en utilisant la sémiologie graphique, a conçu des éléments graphiques qui représentent les actions d'un pilote sur l'écran de son collègue dans un outil nommé "Gesture View". Deux types d'informations, relatives soit au langage corporel, soit aux interactions avec le système avionique, ont pu être combinées. Il a fallu décider si l'amélioration de la conscience mutuelle devait reposer sur la représentation du *comportement* du pilote ou simplement fournir de meilleures visualisations de l'*état de l'avion* résultant des interactions sur les systèmes avioniques. En ce qui concerne le comportement, la littérature sur les gestes fournit des indications pour comprendre les principales fonctions des gestes (déictique, ergotique, ...) [FR91][Ken04][Km05], pour concevoir des gestes compréhensibles [WMW09], et pour représenter les gestes [MZN18]. Cependant, grâce à l'étude de l'activité, aux explorations de conception et au retour d'information obtenu des pilotes, nous avons compris qu'il n'est peut-être pas nécessaire de refléter les gestes eux-mêmes pour transmettre les informations requises pour la conscience mutuelle. Une ap-

proche plus efficace consistait à laisser un pilote percevoir l'effet, ou la *signification*, des gestes de l'autre pilote, en se reposant sur deux interprétations du mot "effet" : comme *résultat* de l'action effectuée, et comme une *impression* faite sur la perception.

Design : dimensions et variables visuelles

Il s'agissait ainsi de fournir un ensemble de dimensions gestuelles pertinentes pour représenter la signification des gestes pour la conscience mutuelle dans un contexte critique [GA12], ainsi que les éléments graphiques à leur associer.

		GRAPHICS VARIABLES PER DESIGN							
		D1 Honeycomb	D2 Timeline	D3 Bricks	D4 Onion	D5 Finger Shadow	D6 Button Shadow	D7 Blurring	D8 Rim Texture
DIMENSIONS OF GESTURE	G1 Localisation								
	G2 Time & rhythm								
	G3 Move								
	G4 Intention								
	G5 Status								
	G6 Identification								
	G7 Trace								
	G8 Completeness								
	G9 Role								

FIGURE 5.1 – Identification et représentation schématique des variables visuelles utilisées (position, shape, hue, saturation, text, animation, opacity, gestalt, blur, orientation, texture, value) pour chacun des huit designs (colonnes) et leur correspondance avec les neuf dimensions du geste (lignes).

Designs proposés aux pilotes

La table D.1 décrit certains des designs discutés avec les pilotes, utilisant les variables visuelles décrites dans la figure 5.1. Les conceptions qui figurent dans cette table parcourent les dimensions du geste de manière très systématique avec des représentations mettant en oeuvre toute la palette des variables visuelles définie par Jacques Bertin [Ber77]. La description de ces designs est disponible en annexe D.2.

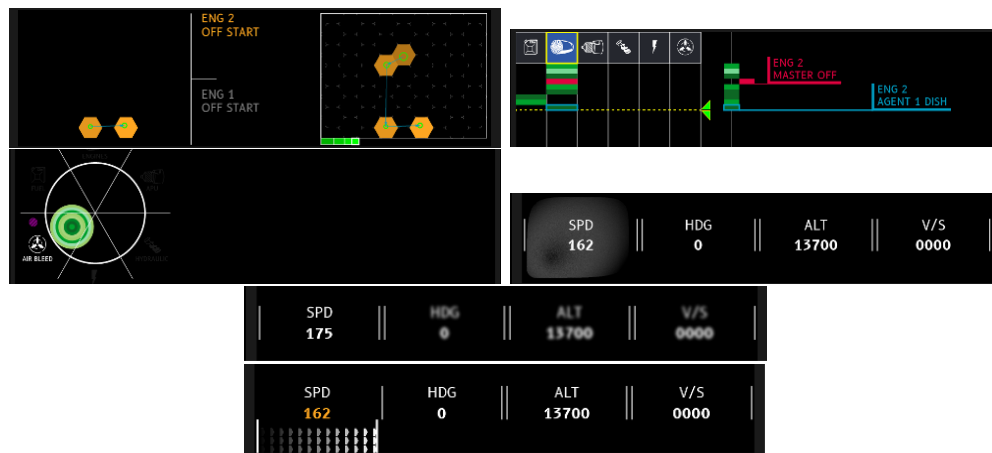


FIGURE 5.2 – Designs de GestureView : D1, D3, D4, D5, D7 et D8

Analyse des designs auprès des pilotes

Sans reporter l'analyse complète des évaluations qualitatives menées auprès des pilotes (voir annexe D.3), il semble important de souligner l'efficacité des designs proposés en termes de perception d'une interaction réalisée. Les dimensions et leurs variables, sans vouloir recopier l'interaction, représentent une *effectuation* réelle, non tant d'un geste que d'un ensemble d'éléments construisant - individualisant - en même temps et de manière cohérente l'état du système et l'état de la collaboration.

L'accent a pu être mis sur la matérialité. En effet, les pilotes ont commenté les designs qui apportent des détails pour transmettre plus de "matérialité", par exemple en soulignant la rugosité d'un bouton (D8), la forme du doigt (D5), ou une nuance perceptive dans les couleurs (D1, D3, D4). Plusieurs

pilotes ont apprécié le design Finger Shadow (D5) : "Oui, ça représente vraiment le doigt qui appuie, plus que les couleurs conventionnelles du truc qui serait comme ça, ça attire plus l'œil je trouve ouais... sur un mouvement...". La conception du flou a déclenché deux réactions opposées. Pour certains pilotes, le flou reflète efficacement un mécanisme de perception visuelle : "Ouais, le Blurring n'est pas mal... parce que comme tu dis, c'est vrai que ton (?) il... plus c'est loin, plus c'est flou (...) on peut vraiment jouer sur les valeurs, donc à mon avis on ne peut pas mettre deux cents valeurs de flou, ça serait trop. Mais peut-être avec une dizaine... vous voyez... et ça fait dix valeurs. C'est quand même énorme, dix valeurs et vous... et c'est vraiment très naturel. Je pense que tout le monde le percevrait très bien." expliquant également que : " finalement la couleur est vite agressive " (D7). Son collègue a souligné la progressivité : " dès que tu finis celle-ci [la vitesse] et que tu passes à une autre, ça s'estompe progressivement, l'autre devient super claire, et donc tu as un changement super progressif " (D7). Cependant, un autre pilote a rejeté le flou comme étant dangereux car il empêchait le libre accès à l'information. Comme le dit un pilote : "En termes d'information, ce qui est intolérable c'est de ne pas pouvoir accéder à quelque chose. Vous comprenez ce que je veux dire, quand vous êtes dans un cockpit, vous ne pouvez peut-être pas tout afficher, mais vous devez pouvoir y accéder. Ce qui est vraiment ennuyeux, c'est quand vous ne pouvez pas y accéder". La conception de Rim Texture (D8) impliquait également la matérialité et la perception, mais elle s'est avérée non pertinente. L'imitation du granulé tactile des boutons crantés avec de minuscules formes graphiques, visant à différencier les boutons, était trop petite pour être remarquée. Enfin, les couleurs étant une information très codifiée des systèmes aéronautiques, il faut éviter de fournir des dégradés ou des nuances de couleurs : "Je préférerais voir plutôt des ON OFF. Parce que maintenant vous voyez que ce n'est pas très clair le gradient d'opacité, il faudrait que ce soit plus marqué." (D8).

5.2 Voir l'interaction distante

5.2.1 Le contexte du Single Pilot Operation

Les concepts de SPO et d'équipage réduit (RCO Reduced Crew Operation) sont depuis une dizaine d'années un objet d'études et de recherches de la part d'organismes tels que la NASA [WG15] ou le DARPA [DAR14]. Les in-

dustriels s'y intéressent également, qu'il s'agisse d'Airbus [Cle] ou de Boeing, la possibilité d'économiser le coût d'un pilote sur deux présentant un avantage commercial considérable vis-à-vis des compagnies aériennes puisque le salaire des pilotes représente une part très importante de leur budget (jusqu'à 40% pour les très gros jets [BJS14]). Le SPO induirait ainsi une économie de dix milliards d'euros par an en 2030 selon l'estimation de IAC Partners sur une flotte de 1 100 appareils, soit sensiblement un an de production d'Airbus et de Boeing. L'avènement du concept de SPO suit également une logique qui depuis 25 ans a vu le nombre de membres d'équipage passer de 5 à 2, les rôles de l'opérateur radio, du navigateur et du mécanicien ayant été transférés soit aux deux pilotes soit aux systèmes avioniques. De manière générale, le concept de SPO s'appuie sur le développement croissant des systèmes informatiques dans l'avion, avec notamment sur l'automatisation grandissante des tâches de pilotage et de navigation. Ces systèmes tiennent une place destinée à progresser de manière importante, notamment avec l'intelligence artificielle, permettant de concevoir des assistants artificiels pour par exemple adapter dynamiquement le niveau d'automatisme en fonction d'une surveillance de la charge ou de l'état des pilotes [har]. Si, selon la FAA, le concept de SPO n'apporte rien en soi en termes de sécurité aérienne, essentiellement à cause du problème d'incapacitation potentielle du seul pilote à bord [CBR13], les développements de systèmes accompagnant le concept de SPO apportent quand même des réponses pour la sécurité dans la mesure où ils obligent à démultiplier les éléments de redondance et à renforcer la surveillance et l'assistance, en s'appuyant notamment sur des moyens importants au sol (informations météo, accès aux systèmes d'information en général, équipes dédiées et spécialisées). A ce jour, les industriels, s'appuyant sur leur savoir-faire en termes d'aéronefs autonomes (par exemple pour Airbus CityAirbus, Vahana ou Pop Up Next), sont en train de tester toutes les briques technologiques nécessaires et prévoient une mise en opération assez rapide des premiers principes de SPO (2023 sur A350 selon certains reportages [ade19]), même si c'est d'abord seulement en phase croisière, avec le concept de SPO in cruise (SPIC).

5.2.2 Conscience mutuelle dans la collaboration temps réel à distance

Ce nouveau concept de SPO implique la résolution de cinq problématiques [SS20] : les problèmes opérationnels, les problèmes communicationnels et sociaux, le problème des automatismes, les problèmes de certifications et pour finir les problèmes d'incapacitation du pilote. De nombreux projets de recherche se développent autour de ces problématiques, avec notamment le développement d'algorithmes d'apprentissage artificiel, les assistants virtuels comme dans le projet [har], la réflexion sur l'interaction avec les automatismes [EK95], avec la surveillance de paramètres physiologiques et la mise en place de dispositifs neurobiologiques, ou encore l'étude de modèles cognitifs des processus de décision [SM10].

Face à ces directions, l'objet de ce travail de thèse co-encadrée avec Mickaël Causse (ISAE) et Jean-Paul Imbert (ENAC) est de s'intéresser plus particulièrement à l'aspect communicationnel dans la collaboration à distance, et plus particulièrement la communication non-verbale. En effet le principe de SPO s'accompagne toujours d'une assistance au sol, soit sous la forme d'un dispatcher spécialisé, soit sous la forme d'un pilote distant, un peu analogue au pilote de drones [BLBJ15]. Cette séparation géographique (bord/sol) amène une modification d'une partie des modalités de collaboration. Certaines modalités vont pouvoir être conservées, comme la voix, grâce à l'utilisation d'outils tel que la radiocommunication. D'autres, comme les gestes, vont disparaître et impacter la communication non-verbale chez les deux collaborateurs. La communication, verbale ou non, est nécessaire au pilote pour la conscience mutuelle, c'est-à-dire pour connaître et comprendre les activités, les intentions et le statut de son binôme, qui lui en retour doit pouvoir être conscient de la prise de conscience de l'autre. Il est non seulement important lors de la collaboration entre les deux pilotes de savoir ce que son partenaire fait, mais aussi pourquoi, dans quel but et pour quel contexte. Le problème de la collaboration à distance est étudié depuis longtemps en CSCW (Computer Supported Cooperative Work), avec la proposition d'outils supportant cette activité, notamment sous la forme des mediaspaces [BD97]. Les travaux tant anciens que récents sur le sujet n'abordent cependant pas le type de collaboration tout à fait particulier se déroulant dans le pilotage d'un avion, qui présente une complexité rendant cette activité difficilement classifiable entre coopération et conflit [LBM⁺14]. Si les pilotes ont en effet un même objectif général de sûreté et d'efficacité, leur rôles différents de PF

(pilot flying) et PM (pilot monitoring) les amènent à des priorités potentiellement différentes si les conditions s'avèrent anormales. Ce qui permet à ces interactions de se dérouler correctement aujourd'hui réside à la fois dans des procédures apprises (CRM : Crew Resource Management) et dans la nature des interactions, souvent non verbales, que la co-localisation [OJW⁺19] dans le cockpit rend possibles.

La problématique de la collaboration à distance dans le cadre du cockpit est étudiée en profondeur par le NASA Ames Research Center (e.g [BLBJ15] [LBM⁺14] [LBB⁺14]), avec notamment la conception d'une plateforme dont les différentes options de configuration comme station au sol permettent de tester différentes hypothèses, concernant notamment les problèmes potentiels de conscience de la situation [BLBJ15] pour un "pilote-dispatcher" au sol ayant à gérer plusieurs vols en mode SPO, ou la perte de données induite par une communication uniquement verbale [LBM⁺14]. Ces travaux démontrent en particulier la difficulté d'obtenir une conscience de la situation continue concernant un avion pour le dispatcher, même si cela n'induit pas nécessairement de mauvaise décision. Ils constatent également que la perte de la communication non verbale entre le cockpit et le sol, si elle ne pose pas de problème majeur de décision, par exemple pour choisir un aéroport de déroutement en cas de problème technique ou médical à bord ou en cas de problème météo, s'accompagne cependant d'une perte observable de conscience mutuelle, même en fournissant des indicateurs de CRM sur les rôles, les actions et les confirmations. Ainsi, des confusions sont constatées à divers niveaux, concernant par exemple ce que fait l'autre pilote, ou à quelle partie d'un document (de briefing, d'approche) il référence dans la discussion [LBM⁺14]. Les auteurs constatent ainsi l'importance d'un espace physique de référencement commun dans lequel les objets physiques, leurs déplacements, leur manipulation, sont tacitement situés par les deux pilotes. Lors d'une étude ultérieure, Lachter et al [LBB⁺04] ont identifiées cinq problématiques plus précises relatives à la conscience mutuelle et liées à la communication : le problème d'incertitude des rôles, des actions, des manipulations, un problème de prise de décision mais également un problème de rassemblement des informations.

Les solutions pour suppléer à cette perte de conscience mutuelle à distance, outre des documents partagés (cartes d'approche, checklists, ...), des indicateurs visuels de CRM, et des outils d'annotation, comprennent notamment des outils s'appuyant sur la vidéo. Les travaux du NASA Ames Center [BLBJ15], ainsi que des travaux sur la vidéo dans les mediaspaces

pour la collaboration à distance [HL93] démontrent cependant que l'utilisation de la vidéo ne présente pas nécessairement une solution efficace pour ce type de communication non verbale. Les pilotes ayant participé aux études y voient surtout un apport trop riche d'information, inutilisable de fait et surtout augmentant potentiellement leur charge cognitive. Certaines directions, telles que l'utilisation de la réalité augmentée pour transmettre des éléments de contexte pour la conscience de la situation ont été explorées [LLDC20], mais leur application au SPO risque de poser des problèmes similaires en termes de surcharge d'information. La surcharge d'information réaliste est un problème qui est par ailleurs mis en avant dans la thèse de Valentin Becquet décrite dans la section 5.1, où différents dispositifs ont été proposés pour pallier la perte de conscience mutuelle entre des pilotes dans un cockpit tactile [BLVP19] : alors qu'il s'agissait de suppléer à une perte de perception des gestes de l'autre pilote, nous avons constaté que seule une représentation abstraite de ce que constitue l'effet d'un geste a pu être jugé utile par les pilotes participant à l'étude. Enfin, l'évaluation plutôt négative par des pilotes des outils d'annotation [BLBJ15] illustre un aspect important pour un dispositif de support SPO, qui est le fait qu'un outil doit le moins possible nécessiter de travail supplémentaire pour les pilotes, et doit si possible s'intégrer sans rupture aux tâches centrales de l'activité.

Notre approche, face à ces difficultés, consiste dès lors en premier lieu de mieux comprendre la mise en place de la conscience mutuelle des pilotes et étudier l'impact de sa modification au sein d'un équipage [BLCI21]. Selon Schmidt [Sch98], la conscience mutuelle correspond à « la perception et la compréhension des activités d'un membre A, y compris l'intention, le statut et les résultats possibles de cette activité, par le membre B ». Dans un cockpit, les pilotes vont réussir à mettre en cohérence et intégrer leurs actions de façon discrète afin d'aboutir à un objectif commun. Cette conscience de l'activité de l'autre peut être communiquée de manière explicite (communication orale ou numérique) ou implicite (intonation dans la voix, modulation des gestes) lors d'une action. Par exemple, lors d'une conversation entre deux personnes séparées, l'un des opérateurs veut souligner l'importance de certaines informations à l'un de ses collègues près de lui. Pour ce faire, celui-ci va moduler l'intonation de sa voix pour indiquer à son collègue ce qu'il doit noter. Cette modulation est appelée « action discrète » [Sch02]. D'après l'auteur, quatre questions nous permettraient de mieux comprendre ces « actions discrètes ». La première correspond à l'identification de l'objectif de l'action : « Sur quelles indices se fonde un acteur lorsqu'il tient compte des activités

d'autrui ? ». La seconde, à la sémantique de l'action et au tri de l'information : « Avec quelles compétences les acteurs coopérants sont-ils capables de donner un sens à ce que font les autres ? ». La troisième se réfère aux indices matériels permettant la compréhension de ces actions : « comment les acteurs exploitent-ils l'environnement matériel et conventionnel dans le suivi des événements en cours ? ». Et enfin, la dernière concerne la pertinence des actions et son intrusion : « Comment l'acteur détermine-t-il ce qui est pertinent pour son propre effort ? Comment un acteur sait-il quand et comment accorder l'intrusion de sa surveillance ou de son affichage ? ». L'utilisation et la résolution de ces quatre questions permettront de guider la création d'un outil adéquat pour le soutien de la conscience mutuelle.

L'identification des modalités et actions discrètes intervenant dans la collaboration entre les pilotes va nous informer sur la conception des outils support. Pour ce faire, une première série de mises en situation a été organisée avec des pilotes professionnels durant l'été 2021. Lors de cette mise en situation, les pilotes ont effectué un vol sur simulateur, mais étaient à distance, dans des locaux différents. Les sessions ont été filmées et des entretiens ont été menés pour recueillir les impressions subjectives des pilotes et leurs remarques sur les aspects opérationnels. Des mesures subjectives vont servir à mesurer la conscience mutuelle, tels que des questionnaires [MPEE04]. La conception d'outils proposant des premières pistes d'affichage d'indicateur pour la conscience est prévue dans les prochains mois à travers des projets étudiant. Ces deux projets consisteront notamment à superposer des informations collaboratives liées aux gestes, au regard et au contexte sur des instruments existants comme le PFD, le ND, ou une vision synthétique de type Synthetic Vision System (SVS) [SKM04].

5.3 **Transparence et opacité dans la collaboration**

La question de la visibilité du geste pose des questions intéressantes pour les analyses de la transparence et de la médiation [Ihd79][Ver05], puisque si d'un côté l'interaction se déroule sans distance, sans devenir objet, dans une relation incarnée, de l'autre, pour les collaborateurs qu'ils soient co-localisés ou distants, il est besoin que cette transparence disparaisse, que l'interaction soit non seulement visible, mais représentée, impliquant une

5.3. TRANSPARENCE ET OPACITÉ DANS LA COLLABORATION 139

relation herméneutique où le geste est cette partie du monde qu'il faut savoir interpréter.

Comme le souligne Wiltse [Wil14], en codifiant la médiation ainsi puisque l'interaction de l'un doit être représentée voire tracée pour l'autre : $I \rightarrow ([trace|substrate] \rightarrow world)$, (le substrat désigne l'ensemble des éléments numériques logiciels et matériels dont est fait un système) :

It should be noted that this structure represents a person perceiving traces in order to gather information about the world. [...] From this perspective that focuses on technological mediation of perception, activities are part of the "world" that is perceived.

Ce que souligne cet auteur est que cette visibilité n'est pas automatique comme dans la réalité matérielle. Passer quelque part dans le numérique n'est pas analogue aux causalités matérielles. Dans le numérique, il faut deux choses : le substrat, et la trace affichée pour la perception :

One very basic and common example is that of a "desire path" worn through grass. Here the material of grass is worn away and eventually disappears along the line traced by many people walking that trajectory over a period of time. The path appears because of the way that the materials of grass and dirt respond to the activity of repeated walking.

Pour parvenir à intégrer une automaticité équivalente, il est nécessaire de considérer le substrat numérique comme "digital material" :

Some such traces of activities are created intentionally (such as photos posted on Facebook or the text of a message), while others are created unintentionally or as the byproduct of activity. These include things such as time stamps, automatically tagged locations, identification of devices used to produce content, "read" receipts or notifications, and general metadata. There is thus a level of automaticity to making activities visible, in which there is in place a digital infrastructure that is designed to automatically respond to certain types of activities in certain ways. The automaticity and physicality of technologies that make activities visible, along with the fact that they are increasingly part of and constitute our environments, suggest that it might be productive to view them as digital materials.

Enfin, l'auteur analyse un découplage entre visibilité et substrat :

Digital materials, in contrast, function in a wide variety of ways that are often far from transparent; they are often encountered incidentally; and there can be a good deal of time that goes by between when traces are registered by digital material and when they are perceived.

La question qui se pose est dès lors de savoir de quelle manière ce découplage induit par la matière digitale peut être compris, comment en extraire du sens, question qui amène des pistes telles que le débogage par l'utilisateur final [Pir84].

5.4 Résumé

Dans ce chapitre, une nouvelle forme matérielle de l'interaction a été présentée, qui consiste dans l'interaction comme objet de perception dans la mesure où l'environnement technique, dans un cas le tactile et dans l'autre la distance, ne permet pas une perception écologique des actions collaboratives. L'approche choisie par Valentin Becquet a été le design graphique abstrait, en explorant systématiquement les variables visuelles qui conviendraient pour les dimensions du geste qu'il avait identifiées comme pertinentes pour la collaboration. L'évaluation de ces graphismes par les pilotes a montré l'intérêt de cette approche qui laisse un espace d'interprétation tout en encodant les informations essentielles. La voie ouverte par cette thèse, celle de la séparation des pilotes d'un même vol et de la collaboration à distance, est poursuivie par la thèse de Maxime Bardou sur le concept de SPO (Single Pilot Operation). Dans cette thèse, l'objectif est de comprendre les éléments tacites intervenant dans la collaboration, afin d'en concevoir des représentations, et de définir des mécanismes de partage d'information adaptés.

Chapitre 6

Créer l'interaction

Après avoir considéré deux domaines de manifestation de la matérialité de l'interaction, ce chapitre aborde plus précisément la matérialité dans la conception, et ce, sous trois formes différentes. Une première partie évoque des travaux à caractère méthodologique qui combinent les cultures de l'ingénierie et de l'IHM (6.1). La seconde partie est un retour réflexif sur sept projets pour y comprendre le contexte et la matérialité de la production d'idées de conception en IHM (6.2). La troisième partie propose des éléments théoriques sur la production d'idées et sur le prototypage (6.3). Elle reprend également au niveau de la conception l'idée de continuité entre interaction et conception, déjà abordée dans le chapitre 2.

6.1 Ingénierie des systèmes interactifs

La question de l'utilisation des méthodes IHM en ingénierie système est un des thèmes centraux de l'équipe Informatique interactive de l'ENAC [GBC17][GB17][Ray18][RPC16]. Je décris trois explorations assez différentes effectuées à l'ENAC sur les possibilités de combiner et d'intégrer la culture et les méthodes de l'ingénierie système et celles de l'IHM. La première exploration, sur la base d'un cas d'étude, étudie comment combiner les outils et méthodes de l'IHM et de l'ingénierie (section 6.1.1). La deuxième est une ébauche d'intégration de considérations d'ingénierie à un projet à culture fortement design, Airtius (section 6.1.2). La troisième considère l'application de méthodes de conception IHM aux outils du programmeur de systèmes interactifs. Ces trois descriptions sont complétées par une sous-section (6.3.3) où

je décris la réflexivité méthodologique proposée aux étudiants du master IHM lors d'un cours sur le prototypage. Enfin, dans l'idée d'intégrer les cultures IHM et ingénierie, une thèse que je co-encadre avec Rob Vingerhoeds (ISAE) doit également commencer à l'automne avec comme sujet : "L'ingénierie des systèmes interactifs entre science du design et design comme science". Le sujet est décrit dans le chapitre 7, section 7.3.4.

6.1.1 Combiner les méthodes d'IHM et d'ingénierie système

Le projet Medusa (cf section E.1.5) a été l'occasion de développer un travail de réflexion sur un processus de conception concret (cas d'étude : surveillance maritime aéroportée) pour répondre à un objectif méthodologique d'intégration des méthodes IHM et ingénierie. Au terme de ce processus concret, l'analyse de l'activité et le prototypage étant terminés, une séance de travail collaborative a notamment été organisée avec les partenaires avec proposition d'une série d'« exercices ». Les participants à ces exercices étaient soit des ingénieurs système, des analystes, des designers, ou des spécialistes de facteurs humains.

Exercice 1. Un des exercices consistait à construire le modèle formel de l'activité des opérateurs en partant d'un scénario précis, rédigé avec l'équipage, décrivant les étapes concrètes et les intervenants d'une mission effectivement réalisée. La tâche opérationnelle était celle de « construction d'une représentation commune de la situation » (fig. 6.1). Le travail collaboratif de modélisation « au tableau » de cette tâche s'appuyait sur le formalisme des effbd (Enhanced Functional Flow Block Diagram), utilisé dans l'industrie ; une analyste système enregistrait le modèle en même temps dans l'éditeur d'effbd développé par Sodius, PME partenaire du projet. Ce travail fut l'occasion d'une prise de conscience des avantages et inconvénients des deux approches, « basées scénarios » ou « basées modèles », avec des exemples concrets de problèmes que rencontrent souvent les ingénieurs et concepteurs. Le manque d'expressivité du formalisme pour modéliser par exemple la collaboration, les actions informelles, le contrôle implicite ou la

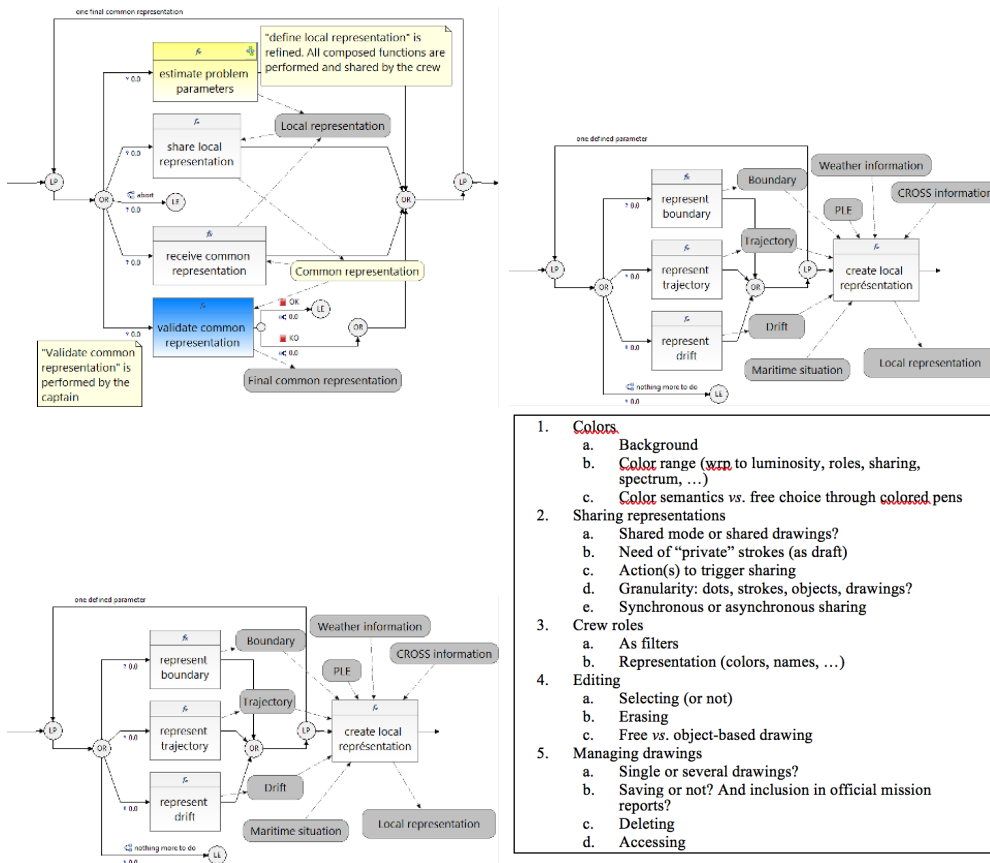


FIGURE 6.1 – Relation entre modèles formels et questions de conception. a : parvenir à un accord à partir de différents points de vue complémentaires, b : estimation itérative des contraintes du problème, c : tâches de représentation, d : questions de conception.

portée des données fut notamment soulignée.

Par exemple l'un des scénarios concernait la montée éventuelle de désaccords au sein de l'équipage, et s'appuyait sur les entretiens retranscrits en format textuel. L'opérateur radar avait expliqué, lorsqu'il a été interrogé sur les désaccords potentiels : "Eh bien... nous ne sommes pas en désaccord... bien sûr nous sommes différents... c'est plutôt que... pendant que nous réfléchissons en discutant... nous arrivons à un accord... ". L'idée est donc plutôt de parvenir à un accord à partir de différents points de vue complémentaires que de négocier une décision à partir de points de vue contradictoires. Cette différence assez subtile peut difficilement être transmise par un modèle de tâche (fig. 6.1.a), et pourtant, elle permet de comprendre, voire de justifier des décisions de conception, non seulement sur le type de partage d'information à fournir dans l'IHM, mais aussi le type de gestion des dessins des stratégies, qui se doit d'être assez souple, sans nécessiter d'outils de gestion.

Exercice 2. Un autre exercice, réalisé de manière délocalisée, avait consisté, à l'inverse, à évaluer l'utilité des modèles formels amorcés lors de cette séance, notamment pour instruire des questions de conception. Une séance complète de conception d'une tablette collaborative avait été enregistrée et transcrite, permettant une classification des questions de conception abordées. Les modèles effbd ont permis de valider certains de ces choix, comme le choix du nombre de schémas que l'opérateur pourrait conserver dans la tablette, ou le choix des différentes modalités et granularités du partage des données entre opérateurs.

Par exemple, les couleurs de l'interface ont d'abord été décidées en fonction des contraintes environnementales (luminosité, etc.) (fig. 6.1.d : questions 1.a et 1.b). Nous avons finalement choisi de laisser les utilisateurs allouer les couleurs librement plutôt que d'associer une couleur à un rôle, ou à un type de partage (fig. 6.1.d : question 1.d). Pour effectuer ce choix, le modèle de tâche effbd ne donnait pas d'indications directes, mais il a) écartait les rôles explicites, b) reconnaissait deux modes de partage - ce qui peut plaider en faveur d'une certaine flexibilité et ne pas imposer l'attribution d'une couleur pour l'un de ces modes. Autre exemple : le modèle de tâche soutient le partage synchrone (fig. 6.1.d : 2.e) au niveau du trait, plutôt qu'au niveau du dessin (fig. 6.1.d : question 2.d) : comme spécifié dans la fig 6.1.b, l'estimation itérative des contraintes du problème - dérive ou limites - représentés par de simples traits, et le partage de chaque estimation, nécessitent de permettre ce type de congruence du temps d'affichage, plutôt que d'attendre qu'un dessin entier soit terminé.

Exercice 3. Un troisième exercice a enfin permis d'expérimenter comment, à l'inverse, la considération des questions de conception permet d'affiner les modèles. Les discussions de conception permettent d'itérer sur les modèles et de les consolider progressivement [CR92].

Par exemple, la discussion sur le niveau de partage des stratégies a conduit à une réflexion sur les tâches de représentation (fig. 6.1.c), actuellement limitées à trois objets prédéfinis. Une certaine flexibilité manquait dans notre modèle pour décrire le fait que l'équipage devrait être capable de représenter et d'estimer des paramètres de problèmes non anticipés ou simplement de prendre des notes.

Cette description partielle mais détaillée et concrète d'un travail de réflexion méthodologique a pour objet de démontrer diverses possibilités de collaboration fructueuse entre des professions différentes, qui, bien qu'impliquées dans un même projet, peuvent avoir du mal à communiquer de manière productive. Cela illustre l'intérêt de ce type de réflexion à partir d'un processus d'ingénierie concret, évitant de ce fait des discussions creuses sur des aspects « culturels » indécidables.

6.1.2 Vers une méthode pour intégrer l'ingénierie dans un projet "design"

Lors du projet Airtius (cf section 4.3), projet qu'on peut caractériser comme à forte culture "design" (il impliquait en tout cinq designers professionnels, cf section E.1.7), une réflexion méthodologique a été menée pour mieux intégrer des considérations d'ingénierie système, allant jusqu'à "prototyper" une véritable méthode. L'objectif était d'explicitier des *principes de conception* pour un design particulier, en suivant une *méthode systématique*. La méthode suivie est illustrée par le schéma de la figure 6.2.b :

1. Les exigences sont spécifiques à un projet ou à un domaine.
2. Les propriétés de conception des artefacts sont analysés, soit à partir d'un état de l'art, soit à partir de prototypes précédents.
3. Les propriétés de conception sont classées selon des dimensions.
4. Les principes de conception affinent les exigences en s'appuyant sur des propriétés de conception : ils définissent des règles à suivre ou des caractéristiques à fournir pour un design spécifique.

	USABILITY REQUIREMENTS					SAFETY REQUIREMENTS			INDUSTRIAL REQUIREMENTS		
	R.U.1 Direct localisation perception	R.U.2 Situational Awareness	R.U.3 Collaborative Awareness	R.U.4 Operational Performance	R.U.5 Usability in Degraded Context	R.S.1 Safety-critical system	R.S.2 resilience	R.S.3 availability	R.I.1 Dynamicity & adaptability	R.I.2 engineering	R.I.3 Configurability
DEVICE SHAPE PROPERTIES											
Visibility in physical space	Easy & direct access	contextual awareness	shareability					Easy & direct access			
Flexible physical structure				re-configurable if required		re-configurable if required			adaptable & responsive	Reusable shape & devices	customer needs
Eye-free interaction				robustness		robustness					
Graspability				not to much focus		comprehended data & control	alternative modes	availability			
Salience	peripheral perception		shape & relief shareability	shape & relief expressivity							
Safety attached objects				secure access to data and device		avoid dangerous projectile					
EMBODIED PERCEPTION & ACTION											
Non-fragmented visibility			comprehensibility			overall perception					
Performative action			comprehensibility								
Universality of sensorial perception			mutual awareness			ensures mutual awareness		not culturally dependent	easy internationalisation	fewer training, internationalisation	
Body part availability and accessibility	accessibility				degraded context		allows resilience	Ensure accessibility			
Haptic, palm, fingertip				Easy & direct access							
Physical constraints, bimanual gestures	favor physical skills			favor physical skills							
Proprioceptive perception, spatial knowledge	favor physical skills			favor physical skills		performance of physical skills		performance of physical skills			
PROGRAMMABILITY											
Software and physical dynamicity		contextual information	contextual sharing-based information	end-user custom, coherence physical-digital	coherence physical-digital	adapted constraints	alternative modes	availability given phase of flight			end-user customing
genericity				improve learning & skills					widely adaptable	cost effective reusable & settable	
synthetic 3D view	reduce perceptual distance			synthetic information						integrated product	
dynamical composition		cognitive externalization context + focus information	sharing-based information			hierarchical & contextual data		free movability of components	multipurpose use	allows genericity & complexity adaptation to customer needs	allows modularity
contextual filtering				makes tasks easier		reduces cognitive load		make relevant data available			

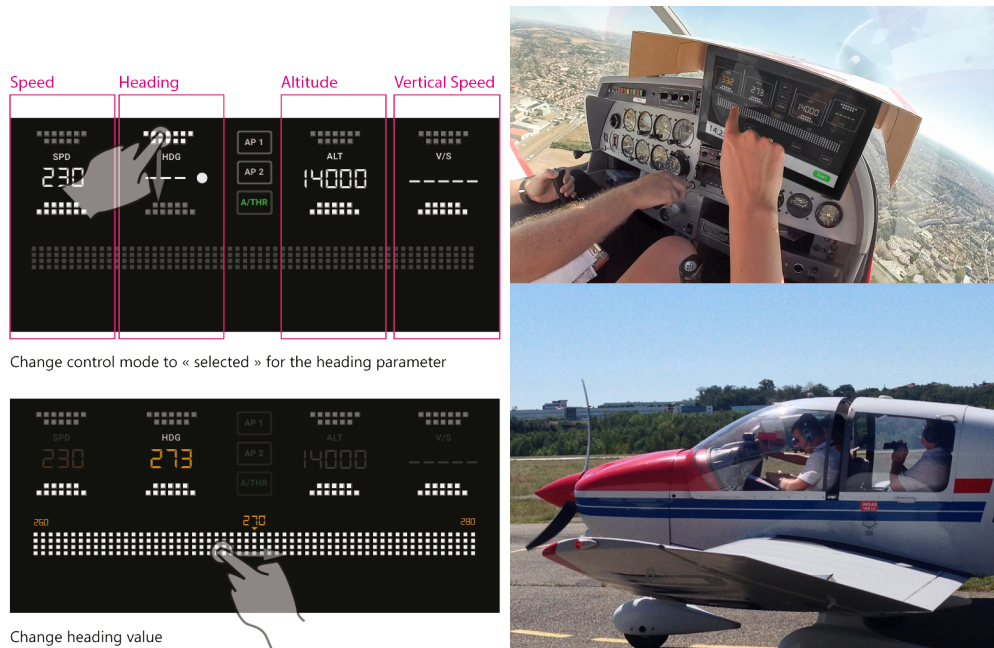
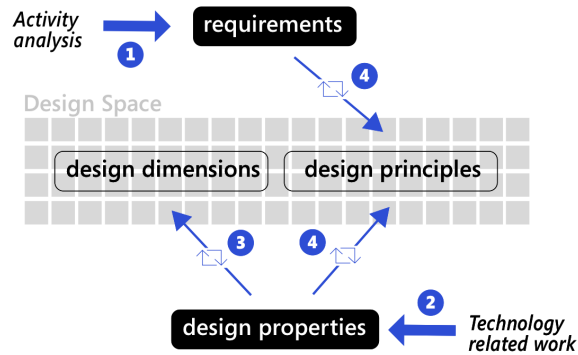


FIGURE 6.2 – Ingénierie et design : cas d'étude du FCU tactile. a) espace de conception, b) méthodologie proposée, c) design graphique du FCU, d) tests

L'espace de conception résultant (fig. 6.2.a) est donc composé d'exigences (colonnes), de propriétés de conception (lignes) et de principes de conception (cellules).

Ces explorations sont décrites dans deux articles, l'un consacré à un état de l'art initial du projet Airtius [VLPC16] (fig. 6.2.a) et le second poursuivant cette exploration en l'appliquant à un cas d'étude concret, un panneau de contrôle (un FCU¹) tactile [LVPL19] (fig. 6.2.c,d). Les exigences pour un cockpit interactif ont été identifiées, tirées des analyses d'activité au cours de plusieurs projets de recherche (étape 1 de la méthode) [VA12][CCGBV14][LVP⁺18] [LZVC15]. Ensuite, les propriétés des technologies tangibles ont été analysées (étape 2). Comme l'illustre le tableau, les propriétés de conception sont également regroupées en trois dimensions plus générales (étape 3) : forme, action et perception incarnées et la programmabilité (sections horizontales). Les principes de conception sont finalement déduits du raffinement des exigences grâce aux propriétés de conception pertinentes (étape 4). Dans le tableau, seuls les principes de conception s'appliquant au cas d'étude sont mentionnés (voir l'article [VLPC16] pour une liste complète).

Par exemple, la règle de "mutual awareness" est un raffinement de l'exigence R.U.3 "Collaborative awareness", déduite de la propriété de perception universelle tirée de l'étude de l'état de l'art [VLPC16]. La règle "robustness" est un raffinement de l'exigence R.S.1, déduite de la propriété "eye-free operation" tirée de l'état de l'art.

6.1.3 Le concepteur comme utilisateur

La distance culturelle entre interaction et conception est telle - sans doute dans tous les systèmes techniques, mais c'est bien le cas en conception de systèmes interactifs - qu'on a rarement le réflexe de penser à l'ingénieur comme un utilisateur (sauf justement dans le cas de programmeurs *utilisateurs finaux*, comme ceux avec lesquels j'ai travaillé durant ma thèse [Let01b][Let05]). Or, l'ingénieur est aussi un utilisateur : ne pas comprendre ses besoins et ne pas étudier l'utilisabilité de ses outils c'est prendre un risque important, surtout dans un domaine critique comme l'aéronautique. Bien que la communauté des chercheurs ait sporadiquement identifié des

1. FCU : Flight Control Unit.

exigences d'utilisabilité pour de tels outils, les fournisseurs de toolkits et de langages de programmation documentent rarement leurs processus de conception et il n'existe aucune référence établie pour comparer ces outils à des exigences. À l'exception notable de Smalltalk [Kay93], la plupart des travaux sur les systèmes interactifs reposent sur l'hypothèse implicite qu'il existe une activité générale de programmation, soutenue par les langages de programmation, et que la programmation de systèmes interactifs en est une spécialisation. Mais dans ce cas, pourquoi les toolkits pour l'interaction offrent-elles des mécanismes spécifiques de structuration des composants [MGM⁺94] et des mécanismes spécifiques de contrôle (dataflow, évènements) au lieu des appels de fonction [Cha07]? Ces outils semblent plus des "correctifs" que des "spécialisations" des langages généraux, et dans certains cas, on peut soupçonner que les incohérences résultantes sont activement nuisibles. En outre, la plupart des outils sont fortement dépendants de la conception des langages de programmation sous-jacents. Ces derniers ont à leur tour été conçus à partir de leur propre ensemble d'exigences, souvent peu documentées, ce qui ajoute à la confusion.

Dans ce projet [LCP⁺10], nous avons passé en revue et classé les exigences et les propriétés souhaitables des outils pour développer des systèmes interactifs. Mais comment étudier les besoins des programmeurs? La méthode de recherche consistait pour cette étude à lire "entre les lignes" les articles de la littérature scientifique décrivant les toolkits, les frameworks, les techniques d'interaction et les langages afin y trouver une description informelle et semi-explicite des besoins. Le principe de la classification utilisée était de considérer la programmation 1) comme une activité intellectuelle nécessitant de minimiser la complexité et l'imprévisibilité, 2) comme une activité de manipulation de concepts divers (graphisme, dispositifs, modalités, état, algorithmes, distribution), 3) comme une activité de construction avec production de code et nécessité de faire correspondre code et exécution, et enfin 4) comme une activité basée sur des processus, avec la nécessité de gérer les cycles de vie et la collaboration, et de favoriser la réutilisabilité.

Cette étude est encore une fois l'occasion de souligner l'importance de comprendre et de surpasser ce hiatus entre utilisation et conception, de progresser vers ce que Simondon appelle une réintégration de la technique dans la culture [Sim58], c'est-à-dire ne pas considérer la technique seulement comme une affaire d'ingénieurs, subissant une évolution autonome et aujourd'hui fatale, mais considérer la technique comme une affaire humaine, qui définit l'humain que nous voulons devenir, comme je le proposerai dans le chapitre

7.

6.2 Analyse de sept processus participatifs

Mon propos ici est de revenir sur le travail de conception auquel j'ai participé depuis ma thèse en faisant ressortir certains des mécanismes techniques, psychologiques, collaboratifs etc, qui me semble-t-il ont contribué à l'émergence d'idées et à leur réalisation. De très nombreuses études se sont bien sûr intéressées au sujet de la créativité et de l'invention (e.g. Csikszentmihalyi pour ne citer qu'un des plus célèbres [Csi96]). Le point de vue que je prends dans ce chapitre est d'analyser des cas concrets, mais plutôt que de les confronter à la littérature sur la créativité, ce qui représenterait un projet en soi, je propose d'en expliciter les traits qualitatifs émergents sous l'angle de l'invention, de la production et de la réalisation d'idées, afin d'expérimenter les concepts d'individuation et de transduction qui sous-tendent mes réflexions dans ce manuscrit, ainsi que la compréhension des liens entre interaction et conception qui en ressort.

Je décris dans l'annexe E.1, de manière aussi systématique que possible, et sous l'angle de la "prise de forme" sept des processus que j'ai observés de l'intérieur : Paperoles et *Musink*, graphenda, Strip'TIC, Ecritures mêlées pour les techniciens de maintenance, Medusa, STAMP et Airtius. Il s'agit donc d'un descriptif factuel des processus avec leurs contingences et facteurs déclenchants, assorti d'éléments d'analyse sur les mécanismes de l'invention, et d'un tableau synoptique reprenant les éléments dimensionnant dégagés pour chaque processus (table E.1 en annexe E.2). L'idéal aurait été d'avoir un regard extérieur sur ces processus : c'est un des aspects du problème de la recherche sur les méthodes de conception. A moins d'être sociologue *et* d'avoir accès aux activités d'un processus (comme e.g. Schön [Sch84]), être observateur implique pour ceux des participants d'un projet qui souhaitent conceptualiser les méthodes d'adopter de temps en temps une position de nature réflexive, mais sans pouvoir prétendre à aucune objectivité. Certains des projets décrits ont fait l'objet d'une réflexivité méthodologique (e.g. Airtius E.1.7, et Medusa E.1.5) que j'ai décrit précédemment (sections 6.1.2 et 6.1.1).

Une petite note également sur les termes utilisés : invention, création, individuation, innovation. Je ne parle pas d'innovation, car il est généralement entendu que ce terme décrit la partie industrielle du processus d'invention

[Bux05] :

Innovation is far more about prospecting, mining, refining and adding value than it is about pure invention.

Le terme création me conviendrait bien, s'il n'était réservé à l'art et à la religion. L'individuation est un terme très général qui désigne le processus d'engendrement de tout être, qu'il soit artificiel, vivant, chimique, atomique, cognitif. Enfin le terme "invention" est l'objet de multiples définitions, mais c'est celui que je vais utiliser en m'attachant au sens qui lui est donné dans la philosophie de Simondon, et que je préciserai dans la section 6.3.4.

6.2.1 Espace de description des processus

Le tableau E.1 en annexe E fournit une vue synthétique de l'analyse de ces processus. Les dimensions qui y sont reportées celles qui m'ont semblé *a posteriori* pertinentes pour comprendre la formation des idées de conception et leur réalisation, *a posteriori* c'est-à-dire après avoir procédé à l'analyse descriptive détaillée telle qu'elle figure dans la section E.1. Ces dimensions n'ont de valeur que comme hypothèses de recherche, et seraient à valider expérimentalement (voir à ce sujet la thèse ingénierie et design commençant à l'automne 2021, section 7.3.4).

La première série de dimensions notées dans le tableau E.1 concerne les objectifs des projets - ce qu'Aristote décrirait comme "cause finale" (objectif de la fabrication) (voir chapitre 2, section 2.5.4) : la ou les origines du projet et de la problématique sont catégorisées selon qu'il s'agit d'une question de recherche, d'un besoin opérationnel, d'une exploration technologique, de former des étudiants dans un projet pédagogique ou d'un cas d'étude pour une question de recherche plus globale. Le but générique de presque tous les projets, qui est de publier, n'est pas précisé (mais la présence de publications est indiquée dans les résultats).

Une deuxième série sont les facteurs déclencheurs et contextuels - ceux qu'Aristote décriraient comme "cause efficiente" (actions qui enclenchent la fabrication) : les dimensions données comme éco-système du projet sont les aspects pratiques, contextuels, voire contingents, tels que le financement (ou pas), le fait que les utilisateurs soient co-localisés, ou même collègues, et si le domaine d'application est commun entre chercheurs et utilisateurs.

Une troisième série de critères concerne les méthodologies utilisées et leur mise en œuvre : tous les projets comportaient des méthodes participatives

(entretiens contextuels, prototypage participatif, scénarios) ; pour certains les ateliers de conception étaient collectifs. La présence de designers ou de "end-user" programmeurs est également reportée, ainsi que l'utilisation de sondes technologiques. Les explorations peuvent avoir été très fonctionnelles, dans le sens où une étude des besoins a été réalisée auprès des utilisateurs pour définir les fonctions à concevoir, par opposition avec des explorations de design s'intéressant plus particulièrement à l'objet ou au concept. Certains projets ont permis une exploration méthodologique.

Les idées dont il s'agit dans la section "Origine des idées" du tableau E.1 sont les idées de haut niveau - non pas les idées de brainstorming, plutôt les idées clefs - qui correspondent au concept recherché, à l'eidos, à la forme pour les designers (cf section 2.5.2), ce qu'Aristote nomme la "cause formelle". Mon objectif est d'essayer d'analyser comment cela a pu se produire. J'ai souhaité identifier les projets où l'idée est venue des utilisateurs, mais aussi lorsque l'idée arrive par un mécanisme analogique ou transductif, ou encore par exploration systématique d'un espace de conception, ce qui est le cas le plus souvent lorsque le projet inclut de nombreux designers.

En plus du rôle des images, des dessins, des représentations, j'ai également noté le "facteur papier", tant il est souvent arrivé que la présence d'une technologie de type papier ou stylo numérique a été déterminante [SH97]. Les dernières catégories "Résultats" et "Liens avec l'enseignement" permettent de caractériser l'aspect production, tant comme artefacts (types d'artefacts, mode d'existence de l'artefact, i.e. démonstration) que comme réflexion, publication, concepts générique, questions de recherche pour d'autres projets ou thèses, exemples pour les cours.

6.2.2 Synthèse des descriptions de processus

La synthèse que je propose de faire à partir de des analyses détaillées en annexe E consiste à identifier différents thèmes liés à la conception. Ces thèmes - sauf le premier et le dernier - sont développés dans la section suivante (6.3.4). Les concepts de Simondon n'apportent pas d'éclairage particulier sur le premier thème, et le dernier, lié à la matérialité, a été abordé au chapitre 2 (section 2.7.4).

Re-formulation de problèmes. Ce type d'élaboration est inhérent à tout processus de conception, mais c'est en particulier lors du projet "Medusa-méthode" (annexe E.1.5) qu'il a pu être observé avec la

re-formulation du problème du design basé modèle en problème de conception participative.

Analogie transductive. Une première étape de prise de forme est observable dans les descriptions de processus. Il s'agit de celle qui fait apparaître le concept (la cause formelle) par transduction ou analogie, notamment dans le contexte de l'écriture dont on a observé la transductivité (cf 3.3.3), et ce, plusieurs fois face à un besoin de spatialiser des activités temporelles. Il s'agit des processus :

- graphenda : papier transductif, analogie écriture/programmation et concept d'écriture comme mise en relation réflexive et programmation (E.1.2)
- *Musink* : analogie entre deux logiciels (Open Music et *Musink*) proposée par un des chercheurs ; analogie geste/programmation et concept d'interprétation différée semi-structurée des gestes (E.1.1)
- Ecritures mêlées pour les techniciens de maintenance : papier transductif (E.1.4)
- "Medusa-cas" : transduction métaphorique du bus audio pour une tablette collaborative (E.1.5)
- Airtius/GazeForm : transfert du concept de zoom contrôlé par le regard au concept de modalité physique-tactile contrôlée par le regard (E.1.7)
- Airtius/Multiplié : transduction de la structure rythmique de la collaboration observée dans l'activité vers le concept de plis (E.1.7)

Dans les cas de graphenda et des écritures mêlées pour la maintenance, le concept est venu d'un utilisateur. Dans le cas de *Musink*, l'analogie entre les logiciels venait d'un des chercheurs, mais a fonctionné instantanément.

Images et exploration de l'espace de design. Ce type d'élaboration est associé à une intense activité de design au sens d'un travail sur les images, le dessin, le maquettage papier/carton/vidéo. Les deux processus qui incluent significativement ce type d'élaboration sont Airtius (E.1.7) et GestureView (non analysé parmi les sept processus mais décrit chapitre 5, notamment section 5.1.3), menés par des designers professionnels, ainsi que Strip'TIC (E.1.3, mais dans une moindre mesure parce que le designer, un contrôleur end-user programmer, avait très clairement en tête la plupart des idées de conception et leurs images associées.

La théorie du cycle des images décrites dans la section suivante me semble un cadre conceptuel potentiellement intéressant.

Prototypage et concrétisation. Les projets Strip'TIC et Airtius ont donné lieu à une intense activité de prototypage fonctionnel et technique. Je différencie ce type d'élaboration du précédent du fait qu'il s'agit d'explorer des éléments particuliers dont veut faire avancer la concrétisation. Dans le cas d'Airtius, ce sont divers projets intermédiaires, souvent des projets étudiants, ou des adaptations de brevets de partenaires, qui ont permis de concrétiser progressivement les dispositifs (E.1.7).

Réalisation et matérialité. Tous les projets ont eu à suivre les "commandements", les exigences et les contraintes du "matériau numérique" qui a guidé la prise de forme, notamment dans l'utilisation de bibliothèques logicielles (cf 2.7.4), mais certains projets ont également eu à intégrer, manipuler et comprendre des contraintes électroniques, physiques ou mécaniques comme Strip'TIC (E.1.3) et Airtius.

Rôle du papier. Le papier joue un rôle essentiel dans plusieurs des projets, depuis sa simple utilisation pour le prototypage jusqu'au paradigme de l'écriture structurant l'émergence des idées (graphenda, Paperoles et *Musink*, Ecritures mêlées pour la maintenance), en passant par la "métaphore" de la feuille (Airtius/Multiplié) et l'objet papier (Strip'TIC, Meducas-cas).

6.3 Compréhensions de l'invention

Dans cette section finale, nous faisons le point sur les mécanismes repérés dans les processus analysés, et explorons les explications théoriques - dont ceux de la philosophie de Simondon - qui peuvent les éclairer. Après avoir rappelé une distinction entre la phylogenèse des objets techniques (lignées techniques) et leur ontogenèse (conception), nous distinguons ce qui relève de l'émergence transductive ou analogique et ce qui relève du travail de l'image. Nous terminons par une analyse du prototypage comme élaboration polymorphe, efficace pour plusieurs de ces aspects de la conception.

6.3.1 Phylogénèse et ontogénèse de l'objet technique

Nous attirons tout d'abord l'attention, comme le fait Hatchuel [Hat16], sur le fait que la concrétisation telle qu'elle est décrite par Simondon ne rend pas compte du processus de conception, mais, et c'est l'originalité de Simondon, plutôt de la genèse de l'objet technique à travers les lignées techniques en fonction des seules propriétés de ce dernier. Le processus de conception, comme le processus d'invention technique, fait l'objet d'une description séparée, comme s'il constituait un facteur externe. En réalité, pour comprendre la relation entre concrétisation et conception ou invention, nous pouvons partir de la description de la transduction que donne Simondon sur le plan épistémologique : « Dans le domaine du savoir, *elle définit la véritable démarche de l'invention*, qui n'est ni inductive ni déductive, mais transductive, c'est-à-dire qu'elle correspond à une découverte des dimensions selon lesquelles une problématique peut être définie ; elle est l'opération analogique en ce qu'elle a de valide. » [Sim05], p 33. Comme le fait remarquer Beaubois [Bon16c], si le MEOT, ou du moins sa première partie, s'intéresse essentiellement à la phylogénèse des objets techniques, une grande partie des textes de Simondon donne une vision de leur ontogénèse. Ce qui nous intéresse donc ici c'est de décrire plus particulièrement ce qui, dans l'invention et la conception de systèmes interactifs, relève d'opérations transductives, afin d'attester de cette possibilité de lier interaction et conception à travers un prisme commun, celui de la transduction.

6.3.2 Dynamicité transductive dans la conception

A travers les projets décrits dans ce chapitre, de nombreux cas attestent de ces situations de transductions au sein de schèmes communs entre usage et objet technique. C'est l'exemple du technicien de maintenance aéronautique (cf E.1.4) transduisant les mécanismes du stylo numérique dans la fonction de "démêlage d'écritures", ou celui du jeune compositeur américain (cf E.1.1) transduisant la programmation en Open Music dans la programmation par gestes dans *Musink*, ainsi que celui du chercheur en biologie (cf E.1.2) transduisant les possibilités de calcul du stylo dans ses besoins d'annotation d'images de cellule, ou encore l'exemple du commandant de bord de l'équipage jouant avec un bloc de papier et un stylo levé en l'air pour que tout le monde le partage (cf E.1.5). Les exemples en maintenance et en biologie illustrent des conditions similaires d'émergence d'idées nouvelles :

un besoin pratique qui se reconnaît dans l'espace de solution d'un outil technique, et un outil technique combinant des possibilités numériques au papier. Les transductions s'opèrent ainsi entre des domaines techniques qu'on a coutume d'opposer (le stylo et le numérique) et qui sont tout de même assez distants. Comme l'explique Mackenzie «The hallmark of a transductive process is the intersection and knotting together of diverse realities.» [Mac02]. Ce serait la force des images associées à des pratiques en tension qui semble contribuer au passage. Du fait de la contextualisation - comme opérateur analogique efficace - ce sont bien sûr, et parce que ce sont des exemples, des usages qui sont proposés. Mais c'est en réalité aussi le principe technique qui s'invente dans cette contextualisation, à travers ces instances : principe d'écriture numérique par mise en relation (section 3.4), principe d'interprétation différée semi-structurée (section 3.4.3), etc.

La réponse que donne d'ailleurs Schön dans "The reflective practitioner" [Sch84] à la question : "How can a inquirer use what he already knows in a situation which he takes to be unique?" décrit un mécanisme qui évoque particulièrement bien la transduction. Dans l'analyse de Schön, un praticien parvient en effet à voir dans *cette* situation précise qu'il traite, une situation *différente mais similaire* à une autre, un exemple qu'il puise dans le répertoire d'images de son expérience, et ce mécanisme a une précedence forte par rapport à d'autres :

His basic criterion is a perception of similarity that is both logically and psychologically prior to any of the numerous criteria by which that same identification might have been made.

Schön dénomme ce mécanisme "seeing *this ... as that ...*", et remarque qu'il s'accompagne d'un "doing in *this* situation *as in that* situation", soulignant un fonctionnement analogique également au niveau opératoire. Il souligne enfin que ce mécanisme n'est ni déductif (comme instance d'une catégorie standard) ni inductif (donnant lieu à un principe général) ([Sch84] p 140), ce qui rappelle la citation ci-dessus sur la transduction (cf 6.3.1).

Cycle des images et conception

La thèse proposée par Simondon dans son cours sur Imagination et invention [Sim08] explicite particulièrement bien la dimension opératoire de ces schèmes, et fournit un cadre conceptuel pour comprendre tout particulièrement le prototypage participatif. Selon la théorie du cycle de l'image

qui est exposée dans ce cours (cours donné dans les années 1965-1966), imagination reproductrice et invention ne sont ni des réalités séparées ni des termes opposés, mais des phases successives d'un unique processus de genèse, comparable en son déroulement aux autres processus de genèse que le monde vivant nous présente.

1. L'image est d'abord, au début de la vie, un faisceau de tendances motrices, anticipation à long terme de l'expérience de l'objet. C'est le comportement programmé génétiquement, qui conduit le jeune vivant dans son milieu, avant toute expérience et reconnaissance d'objet, dans une pure spontanéité motrice, en quoi consiste alors l'image.
2. Ensuite l'image devient un mode d'accueil des signaux et informations venant du milieu et une source de schèmes de réponse à ces stimulations, les diverses images s'organisant progressivement en sous-ensembles sous l'effet de l'expérience (phase de perception).
3. Enfin les images s'organisent et se systématisent en "un véritable monde mental" (notamment sous l'influence de la résonance affectivo-émotive), par lequel "le sujet possède un analogue du milieu extérieur".
4. De l'univers de symboles intérieurement organisé, tendant à la saturation, peut surgir l'invention qui est la mise en jeu d'un système dimensionnel plus puissant, capable d'intégrer plus d'images complètes selon le mode de la compatibilité synergique. Après l'invention, quatrième phase du devenir des images, le cycle recommence, par une nouvelle anticipation de la rencontre de l'objet, qui peut être sa production.

Le mouvement, la motricité, est donc originaire dans le cycle de l'image de Simondon, sans objet au début, et cela va jusqu'à l'invention : on ne peut pas s'empêcher à l'importance du mouvement (dunamis) dans le schème hylémorphique (chapitre 2, section 2.5.4). La forme préalablement donnée est ainsi de cette nature-là, motrice : le système auto-cinétique (le faisceau de tendances motrices) individuant et progressant vers l'invention. A la 1ère étape, celle de la croissance spontanée, "chaque image, embryon d'activité motrice et perceptive, se développe ici pour elle-même, comme une anticipation non contrôlée par la référence externe à l'expérience du milieu" et elle est "riche en éléments moteurs endogènes" (p 19) qui vont servir d'accueil pour la perception. L'invention ce serait un changement de niveau et d'ordre de grandeur dans ce système d'images à l'origine motrices : "Cet univers où

les mouvements, liés à des structures exogènes, sont devenus des forces et des énergies d'état en suspens selon le mode potentiel, est une organisation analogique de symboles ; c'est lorsqu'il est saturé, ne pouvant plus accueillir d'expérience nouvelle, que le sujet doit modifier sa structure pour trouver des dimensions d'organisation plus vastes, plus 'puissantes', capable de surmonter les incompatibilités éprouvées." Les images motrices infra-perceptives initiales auraient par ailleurs la capacité à survivre aux individus et aux groupes qui les véhiculent en empruntant les supports matériels des œuvres et des objets. Cette capacité de la sensibilité humaine à appréhender des phénomènes intra- ou inter-techniques opérant à des échelles d'espace et de temps différentes de celle de la perception "nue" (si une telle chose existait) pourrait sans doute être invoquée dans la recherche sur l'interaction non consciente, comme dans le modèle de flux en interaction égocentrique, où les interactions sont contrôlées par un mixte de processus cognitifs conscients et inconscients [PJ15]. L'aspect opératif de cette relation peut peut-être également faire écho à la notion des gestes épistémiques [KM94], par lesquels c'est le faire qui, en opérant, parvient à déclencher la réflexion.

Beaubois note «l'importance et la démultiplication des images dans le processus de conception (croquis, plans, maquettes, infographies, fictions littéraires, scénarios d'usage, manifestes politiques, etc) », qui « rendent possible la pensée d'une ontogenèse de l'objet et de son cadre de vie associé : la création d'un objet désigne une individuation par un réseau d'images. » [Bea15]. Dans le cadre du projet Medusa, nous décrivons sur un cas d'études spécifique, un scénario de surveillance maritime aéroportée, les transferts de schémas et de décisions de conception qui s'opèrent par utilisation conjointe de documents de niveaux différents (modèles formels, documents de conception, etc) à partir d'un élément artefactuel (scénario de travail) qu'on peut analyser comme jouant le rôle du germe singulier dans le mécanisme transductif décrit par Simondon [LPV⁺14]. Cette hétérogénéité n'est d'ailleurs pas un obstacle en situation d'invention : nous mentionnons dans notre travail de conception avec les compositeurs contemporains de l'IRCAM un transfert imaginaire suggéré à un compositeur d'un logiciel de composition à un autre incluant de la programmation, et ce en présence d'une occurrence précise de tâche de composition (le germe) : par cette transduction le compositeur se mit « à programmer » mais sans programmer sans aucune difficulté particulière [TLM09] . A cette dimension s'associe l'importance, analogue à la contextualisation avec des scénarios, de la «fréquentation du schème technique». Mais la transposition aux techniques numériques, surtout dans les

systèmes interactifs, n'est pas sans problème, et l'activité de modélisation qu'il propose n'est sans doute pas suffisante : «Nous parlerons plutôt de «modélisation» ou de «diagrammatisation» à leur propos : la modélisation numérique de systèmes complexes agit, par exemple, comme fréquentation des schèmes de ces systèmes». C'est encore une «l'analogie comprise comme comparaison de rapports opératoires» qui dont une opération est souhaitable à travers cette «fréquentation» [Bea15].

Schèmes communs, cycle des images et conception participative

Cette théorie apporte des éléments pour répondre à notre question : pourquoi faut-il interagir pour concevoir ? Pourquoi faut-il proposer aux utilisateurs de vivre l'interaction, d'utiliser cet anticipation du système, pour, en tant que concepteur, mieux comprendre les besoins ? Cette question est importante car elle justifie le prototypage participatif qui inclut non seulement l'ingénieur, comme le dit Simondon, mais aussi potentiellement l'utilisateur dans cette origine schématique motrice de l'invention. Non pas que la participation des utilisateurs oblige à prendre une orientation purement fonctionnelle. Les artefacts conçus en atelier participatifs ne commandent en rien la conception finale, ils l'inspirent, mais ils font participer l'utilisateur à ce couplage matériel des schèmes communs sans qu'il soit nécessaire d'y voir la prescription d'un usage. Comme le dit Beaubois [Bea15] :

La logique technique ne prescrit pas un usage, puisqu'une multiplicité d'utilisations différentes peut toujours naître d'un même schème technique, mais elle prescrit néanmoins *une manière d'user* : dans une perspective simondonienne, tout usage, s'il veut être efficace, doit accompagner la technicité de l'objet sans lui faire violence. Telle doit être la conscience technique de l'utilisateur pour Simondon : plusieurs usages peuvent naître d'un même fonctionnement, mais tous se doivent d'épouser le mouvement et les caractéristiques de la matière. C'est en cela qu'il existe bien une prescription de l'usage à partir de la forme de l'objet chez Simondon, non dans sa fin, mais dans la manière d'œuvrer à cette fin. La normativité concerne le comment et non le pourquoi. Les finalités d'usage les plus diverses, les plus fantaisistes même, seraient alors possibles à la condition qu'elles aillent dans le sens du fonctionnement technique : ce qui conditionne, c'est le geste et non la finalité de ce geste.

Raisonnement analogique

Cette théorie du cycle des images pose aussi la question de la valeur associée à un artefact dans la pratique du design et sur son fonctionnement analogique. Cette valeur est une valeur pour une valeur : elle n'est pas seulement contingente, elle est recherchée, et se formule en termes d'harmonie, de convergence, d'équilibre, de cohérence, de satisfaction [Sch84]. On peut légitimement se demander s'il y a quelque part un modèle d'harmonie, des patterns, des principes scientifiques (e.g Gibson, Gestalt) ou si la valeur recherchée est immanente, et ce, même si chez Simondon, la capacité inventive n'est pas de l'ordre du jugement réfléchissant comme chez Kant ² parce qu'elle n'est pas un jugement. Elle est d'abord un rapport pratique aux choses au sens d'une participation sensori-motrice, elle est autant une connaissance qu'un affect et une action, la pensée se plaçant du côté de l'invention particulière [Bea15]. Pour parvenir à une harmonie, le designer est de fait en dialogue avec l'activité, avec le matériel, avec les schèmes techniques. Il est en résonance, il est est, comme le formule l'un d'eux : une éponge. Mais l'éponge est "structurée", transductive : il y a un savoir-faire, des connaissances, des concepts, des imaginaires désirables [Hat16] dans un raisonnement de type analogique. La connaissance des schèmes est ce qui rend possible une pensée inventive du fait même de leur transposabilité : transposer un schème d'une structure à une autre peut ainsi être au principe de l'invention d'une structure nouvelle. A cet égard, Simondon différencie l'analogie comme comparaison de rapports statiques, de rapports structuraux (simple «ressemblances»), de l'analogie comprise comme comparaison de rapports opératoires [Bea15], qui décrit bien ce rôle du "faire" dans un processus de design. C'est bien ce type d'«isodynamisme» qui a pu être mis en œuvre notamment dans un projet comme Airtius, avec de très nombreux ateliers permettant la manipulation et la transformation collective d'objets mais aussi le travail sur les représentations externes bien adaptées à des mécanismes plus complexes - pour faire avancer les prototypes - ou plutôt les schèmes car ce qui évolue, pour Simondon, ce sont les schèmes techniques; ce ne sont pas les objets, mais leur mode d'action.

2. Critique de la faculté de juger [Kan90]

6.3.3 Les prototypes comme artefacts polymorphes

Transductivité des prototypes et scénarios

La conception innovante de systèmes interactifs a ceci de particulier ([GBCP⁺13] [LPV⁺14]), étant donnée la nature co-émergente des besoins et des fonctions à concevoir, qu'elle suppose un certain nombre d'itérations au cours desquels c'est à travers l'utilisation d'ébauches progressives du système, et leur mise en contexte auprès d'utilisateurs, que les spécifications peuvent être obtenues [Cha12][SVC04] (fig. 6.3).

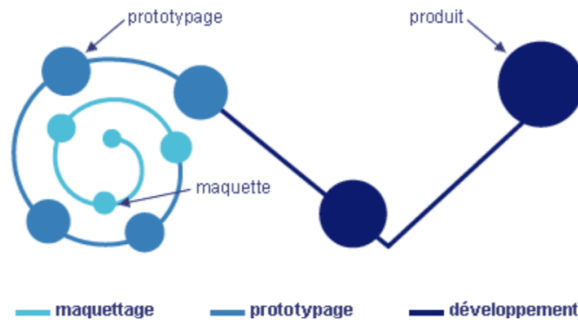


FIGURE 6.3 – Processus de conception itératif intégré au cycle de développement industriel en V. L'objectif du processus itératif est d'obtenir une spécification (en haut de la branche gauche du V). Ce processus permet - entre autres - à des utilisateurs d'*interagir* avec des versions préliminaires et partielles du système [Cha12][SVC04].

Ce fonctionnement itératif repose sur la possibilité des artefacts de conception, notamment les scénarios et les prototypes offline [BLM02], de jouer un rôle pivot. Le modèle cyclique «task/artifact» mis en évidence par Carrol et Rosson [CR92] exprime cette capacité, notamment dans le cycle modélisation/prototypage, avec deux niveaux de spécifications : celui, plus ou moins formel, du modèle de tâche et celui, de l'artefact logiciel qui contient les spécifications de manière implicite, et fournit un autre niveau de formalisation. Le rôle de spécification que peuvent potentiellement jouer des instances d'utilisation explique le rôle pivot du scénario ou du prototype dans la conception de systèmes interactifs, scénarios dont les variantes (scénario d'observation, scénario de conception, etc.) en format divers (texte

libre, texte formaté, storyboard, vidéo) permettent à la fois des contextualisations, variations, contradictions, tensions, normalisations, etc. [AM17].

Les prototypes utilisés dans la conception ont été abondamment étudiés dans la littérature depuis déjà longtemps [HH03][Sch96][BLM02][MCP⁺06][BKH02][Ret94][LST08][VC06][CVL⁺17]. Ce n'est pas le lieu ici de reprendre ces études sous l'angle de la transductivité car ce serait un sujet de thèse en soi, mais ce qui frappe est la multiplicité des rôles qui leur sont reconnus (apprentissage actif, élaboration, exploration, communication [CVL⁺17]), la richesse de leur fonctionnement au cours d'un processus (e.g. comme filtre, manifestation [LST08]), la multiplicité de leurs dimensions d'élaboration ou de raffinement, décrites par de nombreuses typologies [HH03][BLM02][MCP⁺06]. Leur rôle pivot dans la communication avec diverses audiences [BKH02] et dans un contexte pluridisciplinaire [BLM02] est abondamment souligné. Ce qui frappe également est la nécessité de la réflexivité face à ces représentations concrètes [BLM02] qui, contrairement aux modèles (e.g. modèles de tâche, modèles cognitifs, ...) *n'explicitent pas la connaissance* mais la font *fonctionner*, et qui interrogent par leur pouvoir éminemment analogique et transductif, par la contextualisation qu'ils permettent, par leur opérativité, par leur dimension d'images actives, par leur capacité à relier des éléments de conception.

Perception de schèmes dans le prototypage

Nous avons introduit ce principe de communauté de schèmes entre humains et objets techniques, en particulier avec la notion de prégnation (chapitre 2, section 2.7.3). L'importance pour la conception du lien entre schématisation technique présent dans des objets concrets et schème de l'imagination est très bien décrit dans l'article de Beaubois [Bea15] : «L'imagination n'est pas seulement faculté d'inventer ou de susciter des représentations en dehors de la sensation ; elle est aussi capacité de *percevoir*³ dans les objets certaines qualités qui ne sont pas pratiques, qui ne sont ni directement sensorielles ni entièrement géométriques, qui ne se rapportent ni à la pure matière ni à la pure forme, mais qui sont à ce niveau intermédiaire des schèmes.». Cet auteur ajoute ainsi : «L'imagination est transductive en tant qu'elle est d'abord une 'sensibilité particulière' : c'est à partir des choses, ou plutôt à partir des 'régimes' opératoires s'effectuant par les choses, que l'imagina-

3. c'est moi qui souligne

tion prend corps.» Il en souligne la dimension opératoire : «Il ne s'agit ni d'une simple connaissance intellectuelle, ni d'une connaissance sensible, ni d'une connaissance pratique, mais des trois à la fois. Connaître un schème technique consiste à faire fonctionner ce schème sur le plan cognitif, celui-ci possédant une résonance affective et agissant en même temps comme schème d'action, c'est-à-dire comme engagement sensori-moteur dans une pratique inventive.».

Les prototypes comme réalité intermédiaire

Concernant l'étape d'image-symbole, l'image, se caractérisant comme une réalité intermédiaire entre concret/abstrait et entre moi et monde, aurait comme intérêt pour le design est d'être "à moyenne distance", régulatrice : assez abstraite pour dégager un sujet de situations prégnantes mais assez concrète pour contextualiser, contrairement à la pensée abstraite qui peut être un frein, un moyen de refus, en calculant et en montrant les inconvénients à long terme [Sim08]. Son caractère intermédiaire, fait de conscience mais aussi objet, lui donne une intense capacité de propagation, comme on le constate dans le pouvoir inspirant et des prototypes intermédiaires ou les dessin dans un processus de design (e.g Airtius voir section E.1.7). L'image déposée peut devenir source de perceptions complexes, éveillant mouvement, représentation cognitive, affections et émotions :

"L'analyse esthétique et l'analyse technique vont dans le sens de l'invention, car elles opèrent une redécouverte du sens de ces objets-images en les percevant comme organismes, et en suscitant à nouveau leur plénitude imaginaire de réalité inventée et produite."

Métastabilité et prototypage

Les tensions et résolutions que les concepteurs gèrent dans tout processus de conception innovant sont un cas courant de situation métastable (sur la métastabilité voir le chapitre 2 la description de la métastabilité (section 2.7.1). Ce qu'ajoute Simondon à cette description est l'idée que l'objet inventé conserve une énergie potentielle, une réserve métastable qui lui permettra de poursuivre son évolution. Comme l'analyse Viana [Via15] : «for every problem, there is the need to invent a solution to resolve the tensions, in a single new form, which is metastable (that is, contains the tensions that gave origin

to it, and maintains a communication between the different levels of reality that called for it)». Cette double présence de résolutions et de tensions correspond à ce que Hatchuel décrit dans la méthode C-K où C désigne les concepts, l'imaginaire désirable, et K les connaissances, les éléments avérés [Hat16]. On peut se référer, à titre d'exemple, à la réflexion décrite dans [VLPC16] au sujet du cockpit du futur, où est décrite la cohabitation d'éléments avérés tels que des exigences ou des propriétés technologiques et d'éléments relevant de l'«imaginaire désirable» tels que des scénarios futurs et des recouvrements hypothétiques de principes. Ces recouvrements tentent de formaliser l'imaginaire des concepteurs déstabilisé par la convergence de deux lignées techniques incompatibles, celle des éléments monitorés sur des surfaces tactiles et celle des boutons spécifiques à sélection manuelle.

Concrétisation dans le prototypage

Comme vu ci-dessus (6.3.1), le concept de concrétisation ne parle pas du processus de conception mais de l'objet technique lui-même comme lignée évolutive. A ce titre, les analyses de concrétisation que j'ai ébauchées dans ce manuscrit ne sont pas dans ce chapitre, mais dans les sections décrivant les prototypes aux-mêmes (e.g. pour Strip'TIC section 4.2.3, et pour Airtius section 4.3.4).

Cependant, comme le soulignent Houde & Hill [HH03], ce qu'un prototype peut aussi prototyper ce sont les éléments techniques, permettant de dérisquer les challenges techniques qu'il peuvent représenter et faisant par là avancer leur concrétisation. Dans l'annexe E.1 consacrée à la description des processus, ces aspects sont mentionnés dans les rubriques "Concrétisation" et "Matérialité" : un cas emblématique est celui d'Airtius, où de nombreux mini-projets ont permis de prototyper les divers éléments d'un cockpit et de faire avancer le concept général d'un cockpit tangible (fig. E.10).

6.3.4 Interaction et conception (2) : conception dans l'interaction

Nous avons peut-être maintenant plus d'éléments pour mieux comprendre interaction et conception comme des phases d'un continuum. Le chapitre 2 a posé la question de l'interaction co-déterminante [EG88][Ver05] et de la matérialité de l'interaction comme composition [Wib17], composition qui peut se produire dans l'utilisation comme dans la conception, à différentes

échelles, l'une étant possible comme modèle de l'autre. Des éléments pour caractériser l'interaction comme une individuation ont été posés, si déjà on accepte de considérer la perception elle-même comme création d'une forme⁴. Le chapitre 3 a décrit des interactions non seulement réflexives, mais capables de créer des éléments d'interfaces interactives, avec des éléments de programmation par l'utilisateur [TLM09]. Le chapitre 5 a présenté des situations de mise en avant de l'interaction comme objet, rendant potentiellement nécessaire non seulement la conception de traces intentionnelles ou automatiques [BLVP19], mais rendant aussi nécessaire la compréhension du "matériau numérique" causalement responsable des fonctionnements effectifs [Wil14], par des outils probablement apparentés à de débogage par l'utilisateur final.

Il y a au moins deux questions à traiter, selon qu'on parte de la conception ou de l'interaction. Si l'on part de la conception de systèmes interactifs, la question est de comprendre pourquoi, pour bien concevoir des systèmes interactifs, il faut de l'interaction. En effet, et c'est ce que nous enseignons, un des meilleurs moyens de connaître les besoins des utilisateurs pour un système donné est de leur faire utiliser. Comment faire s'il n'existe pas encore, il y a plusieurs réponses, dont l'étude de l'existant, le prototypage, etc. Si on part de l'interaction, on observe que la conception y est tapie sous plusieurs formes : dans les pratiques de customisation [Mac91]. Ainsi Simondon voit dans l'activité de réglage un prolongement de l'action d'invention et de construction, le réglage est une invention perpétuée [Sim58]. La conception est présente également dans la programmation par l'utilisateur au sein de l'interface, pendant l'usage [Let01b][Let05], dans les systèmes qui permettent un certain design de l'interface (tableau de strips, tableurs, etc), et ce d'autant plus lorsque l'utilisateur qu'est le contrôleur aérien devient programmeur comme c'est le cas dans Strip'TIC [HLL⁺12b], dans les systèmes de trace ou de log, dans les forums de discussion et de résolution de problèmes, dans la normalisation des pratiques, etc. toutes choses qui nourrissent potentiellement la conception en retour, notamment lors de groupes utilisateur, et bien sûr dans l'étude d'un système existant. Dans ce chapitre, nous avons

4. "La perception apparait comme un acte d'individuation opéré par un vivant pour résoudre un conflit dans lequel il entre avec son milieu. Dans cette perspective, percevoir ce n'est pas d'abord saisir une forme, mais c'est, au sein d'un ensemble constitué par la relation entre le sujet et le monde, l'acte par lequel le sujet *invente une forme* et modifie par là sa structure propre en même temps que celle de l'objet : on ne perçoit qu'à l'intérieur d'un système tendu dont on est un sous-ensemble" [Com99].

enfin pu repérer un certain nombre de mécanismes et de situations suscitant la conception participative (idées venant de l'utilisateur, mécanismes d'analogie). Enfin, d'un point de vue théorique, certains auteurs analysent la conception d'une médiation comme une opération de réification qui fige une interaction [Hoo14].

6.4 Résumé

Dans ce chapitre j'ai abordé les questions de recherche sur la conception de systèmes interactifs sous trois angles.

1. Ingénierie des systèmes interactifs (ISI) : comment combiner les méthodes de l'ingénierie système avec celles de l'IHM et du design ? J'ai présenté deux projets Medusa et Airtius, qui ont exploré des combinaisons, l'un par une collaboration multi-disciplinaire sur des artefacts de conception produits pour un cas d'étude, l'autre par une proposition de méthode pour définir des principes de conception explorée dans un projet à culture design. Ces explorations seront reprises dans le cadre d'une thèse commençant à l'automne 2021 (cf 7.3.4). Concernant cet aspect ISI, une analyse des besoins pour les outils des concepteurs de systèmes interactifs est également résumée.
2. Analyse de processus de conception de systèmes interactifs : les mécanismes de la production d'idée sont décrits et analysés dans sept processus. Une synthèse a été proposée (cf 6.2.2) dont ressort différents niveaux d'élaboration et mécanismes : re-formulation de problèmes, analogie transductive, images et exploration de l'espace de design, prototypage et concrétisation, réalisation et matérialité.
3. Compréhensions de l'invention : des éléments théoriques sont proposés, illustrés par les exemples de processus, pour comprendre le phénomène de transductivité à l'œuvre dans l'émergence de concepts et la production d'idées. Le cycle des images de Simondon, avec le concept de motricité primaire, fournit un cadre pour comprendre le rôle de l'interaction dans la conception, et le rôle des schèmes communs entre technique et imagination est proposé pour comprendre les mécanismes de la conception participative. La propriété transductive des prototypes est introduite pour ébaucher une explication de leur rôle pivot dans la conception. L'effectivité de l'interaction dans

la conception est soulignée pour nourrir la réflexion sur la continuité entre interaction et conception.

Chapitre 7

Perspectives

Dans ce chapitre, trois perspectives principales sont décrites. La section 7.1 décrit une réflexion en cours sur le concept de surface et de traversée, développée suite aux projets tangibles décrits au chapitre 4. La section 7.2 propose des perspectives en philosophie et IHM. La troisième section 7.3 propose des pistes sur le thème de l'interaction comme une autre façon de penser la technique face à la crise écologique.

7.1 Le concept de traversée pour l'interaction avec et sans surface

Cette réflexion sur le concept de surface s'inscrit dans la perspective d'une contribution à la science des opérations techniques interactives qui a été évoquée au chapitre 2, section 2.7.4.

Selon la littérature, on remarque une difficulté à considérer certains dispositifs comme des interfaces. C'est le cas par exemple des dispositifs d'interaction mid-air ou gestuel qui selon Janlert & Stolterman [JS15] ne peuvent pas être considérés comme des interfaces du fait de leur absence d'interactions liées à une surface (surface-bound modalities). Le terme qu'il choisit est celui de "faceless interaction". Ce concept est compliqué pour plusieurs raisons : il est privatif, et il réduit toute définition au fait d'être muni ou non d'une "face". Tout d'abord, qu'est-ce qu'une "face" dans le cadre de la problématique des interfaces et des surfaces ? Ensuite comment, avec ce privatif, rendre compte du fait qu'il y a bien une médiation ? Comment penser l'interaction avec ces dispositifs : que veut dire une interaction sans inter-

face? Pourquoi une telle importance de la surface dans la discrimination entre interface et sans interface? N'est-ce pas un raccourci sur le plan de la matérialité de l'interaction? N'y aurait-il pas moyen, à travers une autre acception du terme de surface, de repenser le concept d'interface pour les interactions sans support solide?

Le projet est ainsi, dans un article co-écrit avec Sylvain Pauchet et Guillaume Giroud, philosophe, de nous poser la question d'un possible continuum entre les deux concepts d'interface et de surface en IHM, en faisant l'hypothèse que le concept d'interface, à condition de mieux déterminer ce que serait une "face", serait le concept englobant le plus général. Cela amènerait ainsi à pouvoir intégrer le concept de "faceless" dans une notion d'interaction compatible autant avec les surfaces qu'avec les dispositifs sans surface, et qui donnerait des concepts plus solides pour la conception.

Le concept que nous proposons est celui d'interaction métaxique. Ce terme vient du grec *μεταξυ* qui signifie médium, intermédiaire. Comme décrit par Giroud [Gir20], dire que l'interface est un *μεταξυ* c'est dire qu'elle est un à travers [Jul12]. Cela signifie, si on prend le point de vue matériel de l'interaction, de réfléchir à la fois à la matérialité des espaces d'interaction, et nous le ferons avec la notion de traversée, et à la matérialité du corps avec une réflexion sur le toucher. Notre objectif est de fournir au concepteur un cadre conceptuel cohérent et actualisé pour traiter les nouvelles modalités d'interaction, en incluant les modalités qui sortent du paradigme du monde physique quotidien, où les surfaces sont relatives à des objets physiques. Jusqu'à présent, l'essentiel des interactions est dominé par ce paradigme du monde physique. Or, avec les modalités dites "faceless", qui décrivent celles reposant sur la possibilité de traverser un médium [Gibson] (mid-air, ondes ultrason, etc...) (environnements interactifs immersifs spatialisés), le problème se pose de savoir comment ces nouvelles interactions convoquent le toucher, et comment la réponse à cette question peut permettre une redéfinition des surfaces et donc des interfaces? Nous proposons tout d'abord de resituer la problématique dans le cadre d'une approche phénoménologique, avec une conceptualisation du touché, du rapport du touché aux surfaces (en quoi surface liée au touché, pas seulement visible) et du statut du numérique et de l'intouchable. Nous analysons ensuite l'usage du terme de "surface" en IHM en relation avec son usage dans le quotidien (e.g [Hoo14], [Str88]) et en réfléchissant sur ce que cela dit de la nature des surfaces. Enfin nous proposons trois cas d'étude autour de dispositifs immersifs (AR et VR). Nous y analysons la dimension de traversée, l'action de toucher, ce qui est touché et

l'intouchable afin de faire émerger un cadre conceptuel actualisé de la surface en IHM :

1. les ondes vibratoires avec gestes mid-air (e.g Ultrahaptics [CSL⁺13]) : le feedback est haptique, avec des sensations cutanées lors de la "traversée", même si il n'y a pas de "solide", pas d'objet physique
2. les hologrammes : est-ce qu'on touche quelque chose ? il y a un "objet" affiché, et un feedback visuel pour le toucher, mais pas de sensation cutanée en le "traversant" ; parfois, quand ça change couleur, c'est qu'on a "touché"
3. les gestes pour capteurs : on traverse des "zones" abstraites ; même si il a un feedback visuel, il n'y a plus qu'une perception proprioceptive/kinesthésique de l'effet du geste, avec l'image du corps, le schéma corporel comme repère

Nous nous proposons, pour rendre compte des acceptions du terme de surface en IHM et mieux comprendre de quoi nous parlons, d'adopter une démarche similaire à celle de Stroll [Str88] pour qui ce qu'on entend dans le langage par "surface" peut se décliner en différentes catégories. Il y a d'abord une distinction entre les conceptions abstraites (A-surfaces) sont celles qui définissent un objet logique n'ayant pas de réalité physique. Par exemple si on dit qu'une surface, comme la surface d'un lac, est une transition entre deux états de la matière (eau et air), cette surface n'aura aucune épaisseur. Ce ne sera ni de l'eau, ni de l'air, et la surface n'appartiendra ni à l'eau ni à l'air. Une telle surface (qu'il appelle Leonardo ou "LS") est donc une interface entre deux éléments. Un autre exemple de conception abstraite (dite "DS" pour "Delineated") est celle d'une surface qui appartient à quelque chose qui l'a, sans pour autant en faire partie physiquement, comme la limite extérieure d'un objet : c'est une limite logique. Par exemple une bille a une surface. Les conceptions physiques (P-surfaces) sont soit celles de tout le monde (ordinary person's donc "OS"), soit celles des physiciens (d'après un auteur scientifique appelé Somorjai, donc "SS"). Dans ces conceptions-là, la surface a une dimension physique, dont la nature varie d'un objet à l'autre. Par exemple, pour la surface d'une pomme on aura envie de dire qu'on peut la peler, pour la surface d'une boule de billard, on pourra la polir. La surface de l'eau se matérialise par de la glace quand ça gèle. Ce type de surfaces se touchent - moi je dirais qu'elles sont même définies par des interactions de type manipulation. Dans cette conception-là, tout n'a pas de surface : l'air ne se touche pas, par exemple. Les surfaces des physiciens sont

les zones où des types de matière différents interagissent : c'est une couche d'atomes, la dernière couche d'atomes qui séparent les deux types d'éléments. La couche n'est pas forcément régulière. Ces surfaces-là ont des propriétés, on peut expérimenter les interactions. Qu'en est-il en IHM ? Du fait de la réalité technique des dispositifs d'interaction, qu'il s'agisse par exemple d'écrans, de tablettes graphiques ou de surfaces tactiles, le terme de surface désigne des objets précis et concrets mais est aussi utilisé comme un terme générique du fait que de nombreux dispositifs peuvent y correspondre. Nous pouvons ainsi citer : les écrans, les tabletops, les tablettes, mais aussi les surfaces physiques telles que les murs ou le sol, les surfaces transparentes (pour faire de l'augmentation) comme les lunettes, les vitres, etc, ou même parfois des surfaces mobiles et traversables comme un rideau d'eau [ref], ou encore les tissus [BPIH10]. Citons également les objets eux-mêmes avec leur surface [ref Bau], le corps (bras, main) [ref imaginary interface] et enfin les surfaces composites construites à partir d'éléments et de connecteurs comme (LiftTiles, HypoSurfaces, DynaBlock, ...). Tous ces exemples semblent désignables et sont la plupart du temps désignés comme "surface", et cela nous intéresse d'en comprendre la raison.

7.2 IHM et philosophie

Ce manuscrit soulève de nombreuses questions liant IHM et philosophie qui peuvent être développées plus avant, sous la forme d'articles à publier, de projets collaboratifs ou sous forme de thèses pluri-disciplinaires.

Concrétisation des systèmes interactifs. Ce sujet, qui consiste à décrire un objet technique en s'intéressant uniquement à sa genèse matérielle dans une lignée, a été introduit dans le chapitre 2 (section 2.7.4) et illustré avec les prototypes Strip'TIC (4.2.3) et Multiplié (4.3.4). Des travaux analogues ont commencé dans un projet de cladistique des objets tangibles [FRHC18], et dans le projet de musée de l'interaction de l'INRIA [Mac15], mais sans référence au concept de concrétisation. Il serait potentiellement pertinent, pour systématiser la connaissance des schèmes, des lignées techniques, des éléments, des individus et des ensembles techniques interactifs, de contribuer à construire une science des opérations techniques interactives à travers une étude des concrétisations dans ce domaine. Un point de départ pour une thèse pourrait consister à étudier systématiquement les sections

”related work” des articles scientifiques qui font ce recensement de manière implicite. Hatchuel [Hat16] souligne l’intérêt d’un langage à développer pour une *représentation* de ces ”objets d’esprit” que sont aussi les objets techniques, qui permette de les gérer, et de rendre compte de leur nature particulière, de leur fonctionnement et de leur genèse, de manière critique (au sens de la critique d’art) (cf 2.7.4). Ce langage n’est ni celui de l’économie, ni celui du sociologue, ni celui de la science, ni celui du technicien, mais plutôt entre celui de l’ingénieur d’organisation ou du cybernéticien, avec les ”organizing words” [Mil84] (élément, individu, ensemble, fonction, régulation) et celui du vivant (milieu, organe, organisme, métabolisme, évolution).

Prise de forme des systèmes interactifs. Ce manuscrit propose une ébauche d’étude de la prise de forme en IHM à travers la critique du schème hylémorphique par Simondon (sections 2.5.4 et 2.7.2), des exemples d’occurrences de la problématique dans la littérature scientifique (IHM et design) (section 2.5), et des ébauches d’analyse sur les projets auxquels j’ai participé (sections 6.2.2 et 6.3). Un article est en cours à ce sujet, dont l’objectif est de reprendre ces éléments et d’analyser quels sont les besoins sous-jacents pour les designers d’exprimer leur travail en termes de forme et de matière. Ce sujet peut être une des pistes de la thèse sur ingénierie et design (cf 7.3.4). Par ailleurs, certains auteurs comme Ingold ou Maturana pourraient être invoqués, par exemple pour mettre en perspective les réflexions sur l’individuation avec l’embodiment [Ing13] et l’auto-poïèse [MV80][MV92] .

Interaction et conception. Le travail sur cette question de recherche récurrente dans le manuscrit (sections 2.7.5, 6.3.4 et 7.3.6) n’est encore qu’ébauché. Ce sujet pourrait notamment faire l’objet d’une publication dans la conférence Participatory Design Conference (PDC) dans la mesure où d’une part il tente une explication de la nécessité de l’interaction dans la conception, notamment pour des utilisateurs, et où d’autre part il systématise la notion d’interaction individuanante c’est-à-dire concevante.

Médiation et transduction. Avoir présenté à la fois les concepts de Simondon et une théorie de la médiation comme celle de Don Ihde et Verbeek et la manière dont elle est utilisée en IHM (cf 2.4.1) ouvre un questionnement sur le rapport entre médiation et transduction, les deux approches étant des théories de la relation. Simondon évoque ce sujet dans le MEOT [Sim58] :

”La médiation entre l’homme et le monde devient elle-même un monde, la structure du monde”, ce qui, comme l’explique Beaubois [Bon16c], consiste à s’intéresser dans le design à la relation qui fait résonner un objet dans son milieu, entre deux échelles de forme : la forme de l’objet et la forme de la vie habitant ces objets, opérant un changement d’échelle entre l’usage et les ensembles.

Philosophie de l’IHM. Je projette de travailler à un article reprenant principalement l’état de l’art de ce manuscrit pour nourrir le débat sur la contribution de la philosophie à l’IHM et pour la contribution de l’IHM à la philosophie. Concernant notamment le cadre théorique de Simondon, l’article de Carrozzini [Car16b] propose un premier rapprochement de Simondon avec Norman, mais il est sans doute possible de développer les liens entre les deux domaines en prenant en compte la diversité des théories en IHM récentes. Ce travail peut s’appuyer sur Simondon comme dans c’est le cas dans ce manuscrit, mais également se mettre plus explicitement en perspective avec les approches des concepts intermédiaires [HL12][DD14][SW10], du pragmatisme [Hic90][Dal14], de la post-phénoménologie [Ihd79][Ver05]. Un travail de convergence avec la théorie de l’énaction semble également intéressant, car, comme l’explique Derecenne, Simondon fournit les outils conceptuels pour aider l’énaction à concevoir l’articulation entre vie, subjectivité et technique [Der19].

7.3 IHM et écologie

Une très grande partie des chercheurs en IHM s’interrogent aujourd’hui sur les possibilités de l’IHM pour contribuer à la baisse des gaz à effets de serre (GES). Travaillant dans une institution dédiée à l’aéronautique, j’y suis également d’autant plus sensible.

7.3.1 Etat de l’art sur IHM et écologie

Selon Rivière [Riv19], il y a deux grandes manières d’aborder le problème en IHM. La première approche (”green IT”), commune à toutes les technologies numériques, consiste à améliorer les technologies existantes. Pour cela, il faut pouvoir mesurer l’impact des logiciels et objets développés afin de le diminuer. L’IHM peut directement intervenir sur cet aspect en concevant

des outils utilisables aux développeurs, même si on sait que ces améliorations induisent souvent un "effet rebonds" (puisque l'impact diminue, on peut augmenter la consommation). Un impact important pourrait résulter d'une conception efficace notamment pour les dispositifs dont la fabrication et le recyclage constituent une grande part de l'impact environnemental du numérique [Ber18]. La seconde approche ("IT for green") consiste à utiliser les technologies numériques pour sensibiliser au développement durable et influencer les comportements des individus et des groupes d'individus, et ce, pas seulement dans le domaine numérique. Cela passe par exemple par des techniques de conception persuasives [Fog02], déjà utilisées à d'autres fins, mais qui n'ont pas pour objectif de responsabiliser consciemment les citoyens, ou encore par les approches l'approche de type "eco-feedback", basée sur le principe d'auto-surveillance. Les technologies utilisées dans ce cas sont de type ambiant, c'est-à-dire placées au sein de l'environnement de l'utilisateur, perçu par son attention périphérique.

Il existe je pense un troisième type d'approche, un peu plus radicale, qui consiste non pas à soutenir l'optimisation de nos comportements et de nos objets techniques, mais à changer la relation des humains à la technologie et à contribuer, en tant qu'experts en design, à repenser l'équilibre entre systèmes techniques et humains. Cette approche peut sembler irréaliste, mais c'est pourtant celle que préconisait Engelbart à l'origine de l'IHM (cf section 2.4.2)[EG88]. Par ailleurs, et c'est ce que je vais essayer de montrer, il me semble que l'IHM, par son savoir-faire méthodologique et par sa connaissance des relations humains-technique, est particulièrement bien placée et pertinente pour contribuer à cet objectif, qui comporte un volet "complexité" (section 7.3.3), un volet "transparence" (section 7.3.5), et un volet "interaction citoyenne" (section 7.3.6).

7.3.2 Utilisabilité ou éthique ?

L'interaction tangible et incarnée et l'interaction située ont introduit en IHM, de manière assez sensible, la notion que les systèmes interactifs que nous concevons peuvent faire sens dans le monde où nous vivons, avec ses pratiques professionnelles et sociales, et sa diversité culturelle. La question est donc de savoir si, comme le souligne Fallman [Fal11], l'IHM (et le design) doivent rester dans une problématique d'utilisabilité, ou dans une problématique de cohérence et de signification, ou même encore dans une problématique éthique où il s'agirait de fixer des buts dont il serait possible d'évaluer non pas si "cela

fonctionne”, mais si ”cela est bien” :

If we believe that HCI’s goal is to make all artifacts more usable, then it is only logical that ethical issues seem to be outside of our area of study. [...] The non-neutrality of technology also challenges the assumed correspondence between ”useful” and ”good” that through usability permeates HCI. As HCI is involved in designing artifacts that will come to play mediating roles in the actions and experiences of future users of these artifacts, *we as designers are helping to shape ethical and moral decisions and practices.*

Cet élargissement de l’IHM à des objectifs éthiques ne signifie pas pour autant changer de métier. Dans les sections suivantes, je m’attache en effet à montrer que les chercheurs et praticiens de l’IHM sont plus qu’il n’y paraît tout à fait bien placés pour adresser des buts plus généraux, c’est-à-dire en réalité pour travailler sur l’utilisabilité d’un système qu’on pourrait désigner par ”système humain technologique”, et qu’il est possible et souhaitable de développer ces directions.

7.3.3 Nécessité d’une approche globale

Comme évoqué au chapitre 2 (section 2.4), un au-delà du concept d’interaction est envisagé dont le principe est de dépasser l’idée que l’IHM et l’interaction concernent *uniquement* la conception de techniques améliorant l’utilisabilité de la technologie (qui reste un objectif essentiel quand même). D’après Taylor¹, l’IHM est concernée par des systèmes complexes [Tay15] :

The design challenge here shifts away from working within a stable and tightly demarcated interface to making sense of a wider set of fluid relations, ones that we ourselves are inexorably entangled in and thus must be accountable for. The emphasis broadens to be about what worlds we are making, and indeed, the kinds of worlds we want to make.

L’exemple que prend Taylor est celui d’un nouveau système de location de vélos dans Londres parce que ce système, pensé de manière isolée, a modifié

1. A noter que Mitchell Kapor, dans l’article ”A Software Design Manifesto”, plaide également et pour les mêmes raisons que Taylor pour élargir la conception logicielle d’une vision d’ingénieur à une vision plus globale de designer, et ce pas seulement pour l’interface utilisateur [Kap91].

et unifié un certain nombre de territoires au sein desquels la diversité sociale a été réduite.

With such an intermingling of people, things, agencies, and infrastructures, it feels peculiar, misleading even, to cement and narrow in on human-machine interactions and to center agency around the human. [...] These networks of transport (and the technologies and infrastructures that are part of them) present so much more than neatly demarcated interactional problems between human and computer. They invite a deeper understanding of the unfolding relations between humans and things, and their capacities for enabling particular forms of social and civic life.

Or, si cet exemple est bien pertinent pour l'IHM, c'est parce que cette discipline, en partenariat avec le monde du design, s'est dotée depuis assez longtemps de méthodes multi-disciplinaires, qu'elle maîtrise pourtant plutôt bien pour traiter ce type de complexité.

Si nous reprenons les quatre principaux schémas de médiations de la post-phénoménologie, où peut-on placer l'IHM si on considère qu'elle est réduite à une notion d'interface technique? Dans la table 7.1, les loci d'interfaces techniques selon une définition restrictive sont mis en avant en rouge (pour rappel il s'agit des tirets (–) et des barres obliques (/) variation du tiret pour une intégration de type implant; la flèche (→) désigne une relation intentionnelle²).

TABLE 7.1 – Types de médiations selon la post-phénoménologie : où est l'IHM?

incarnée	<i>(humain–technologie) → monde</i>
herméneutique	<i>humain → (technologie–monde)</i>
altérité	<i>humain → technologie(monde)</i>
arrière-plan	<i>humain(technologie/monde)</i>

Est-ce vraiment ainsi que l'IHM veut se définir? L'IHM est-elle la conception des interfaces graphiques et des clics? ou bien plutôt la conception globale de ces médiations non pas une de ces médiations mais de toutes

2. On note la difficulté pour la relation d'altérité, il n'y a pas de locus pour l'interface avec les robots

les combinaisons possibles sachant qu'il s'agit à chaque fois d'une relation humain-monde passant par la technique? On peut prendre l'exemple de la collaboration avec les algorithmes (ou avec les automatismes et avec l'intelligence artificielles) : la conception générale de cette collaboration est-elle l'affaire de compétences en algorithmique ou bien de compétences en interaction de façon à ce que les algorithmes soient conçus en prévision d'intégrer l'interaction d'emblée [LZ03]?

L'approche plus radicale, éthique³, ne consiste-t-elle pas à re-penser complètement les relations humain-technologie de façon à ce que la technique soit pensée consciemment comme partenaire, partie de l'humain et de son écosystème. C'est l'IHM non pas comme conception instrumentale mais comme conception de systèmes socio-techniques, avec une vision écologique sur l'utilisabilité globale du système humain-technologie-environnement, c-à-d les équilibres systémiques, explicité par Guchet comme humanisme technologique [Guc10]. En l'absence de discussion sur la *nature* de la technologie au sein de la communauté du durable, qui laisse largement la place à une position instrumentaliste dépassée, l'enjeu est important [GP11] [Par11].

7.3.4 L'IHM comme approche complexe

Pour parvenir à gérer la complexité, ce qui est aujourd'hui suggéré est d'adopter le systems thinking [Jac19], ou approches systémiques [Moi77][Mor90][dR75]. On différencie ce type de pensée de la pensée analytique par sa capacité non pas seulement à modéliser la complexité mais à adopter une démarche de modélisation complexe [Ros18]. Si on compare les démarches et approches analytiques et systémiques (voir en annexe F), ce qui frappe c'est que l'IHM est entre les deux, selon la manière dont elle est pratiquée, avec - pardon pour la caricature - d'un côté les projets hypothético-déductifs avec expérimentations contrôlées sur des dispositifs techniques très ciblés et dont les questions sont ancrées dans la recherche scientifique en psychologie cognitive, et de l'autre les projet plutôt design avec ancrage dans une étude ethnographique et exploration d'objets pour leur ouverture fonctionnelle et leurs marges d'indétermination par design (type sonde technologique). Mais ce qui est manifeste, c'est que l'IHM *pratique effectivement* les approches et démarches complexes, mais sans l'afficher comme

3. "ethos signifie séjour, lieu d'habitation. Ce mot désigne la région ouverte où l'homme habite" [Hei46]

une compétence disciplinaire explicite.

L'ouvrage de Schön, "The reflective practitioner" [Sch84] est souvent cité comme un compte-rendu (account) de la réflexion dans l'action et du dialogue du designer avec une situation ou avec des matériaux, notamment dans le cadre de la recherche par le design (cet ouvrage est notamment cité sous cet angle dans plusieurs chapitres de "The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.", assez représentative de la culture commune en IHM [SG17][Fis14][dS12][Tra12][OH12]). La première partie de l'ouvrage concerne la crise des professions face aux problèmes caractérisables comme ouverts, évolutifs, instables, indéterministes, non généralisables, conflictuels et incertains, et la nécessité de passer de la rationalité technologique à la réflexion dans l'action (ce point avait été évoqué au chapitre 2 section 2.2). Ce sont bien les principes des approches systémiques qui sont invoqués par Schön, c'est-à-dire la capacité à penser de manière globale, à questionner les problèmes, à travailler dans l'inter-disciplinarité, à considérer les effets des interactions, à comprendre les fonctions utiles des dysfonctionnements (voir aussi l'approche de la sécurité "telle qu'elle se fait", introduite section 4.1.1), etc⁴.

C'est pour cette raison que l'une de mes perspectives principales depuis quelques mois réside dans ces approches complexes, et ce suivant plusieurs axes :

1. organisation d'ateliers sur les approches systémiques
2. mission sur les besoins fondamentaux de l'aérien
3. proposition d'une chaire design à l'ENAC
4. co-direction d'une thèse sur l'ingénierie et design
5. conception et le développements d'outils pour la complexité

Ateliers sur la complexité

Face à la nécessité de changer d'approche pour comprendre et "manipuler" les concepts nécessaires à une transition technologique urgente et nécessaire, que ce soit dans le domaine numérique ou dans le domaine aéronautique, plusieurs groupes de réflexion se sont constitués à l'ENAC

4. J'ai déjà eu l'expérience de l'utilisation des méthodes participatives de l'IHM pour des problèmes très différents. C'est le cas d'activités de "négociations scientifiques" structurées autour d'ateliers de prototypage, qui sont décrites dans un article présenté à Participatory Design Conférence 2004 [LM04]

notamment dans le cadre d'ESTEAM⁵ et de la Fonisen⁶, sur l'avenir du transport aérien, s'articulant sur le constat de la crise environnementale que nous vivons et sa conséquence probable d'un effondrement de nos sociétés. L'idée de mener de telles réflexions n'est pas nouvelle, mais la crise du covid-19 offre une opportunité à son démarrage, car nous pensons que cette crise, par son ampleur et les mesures mises en ?uvre pour tenter de la juguler, préfigure dans une certaine mesure la crise environnementale.

Dans ce cadre, j'ai co-encadré deux stages durant l'été 2020, l'un pour un étudiant de Sciences Po [Esc20], l'autre pour une étudiante de l'ESSEC sur les cartographies de controverses concernant le futur du transport aérien. J'ai également initié des collaborations avec deux mastères, le mastère spécialisé éco-ingénierie de l'INP (MSEI), et le Msc Stratégie et Design pour l'Anthropocène de l'école Strates (section 7.3.4).

Avec le MSEI, nous avons planifié l'organisation d'ateliers collaboratifs pour le personnel de l'ENAC en vue de sensibiliser ce public formé dans une culture "ingénierie" à des méthodes et des concepts complémentaires pour appréhender la transition écologique des projets et des enseignements. Le modus operandi de ces ateliers se veut volontairement émergent, avec travail sur un cas d'étude, celui du transport aérien du futur, et avec une co-organisation de ces ateliers incluant l'ENAC (une petite équipe dont je fais partie) comme une première appropriation des approches.

Mission d'étude des besoins fondamentaux de l'aérien

Avec le Msc Stratégie et Design pour l'Anthropocène, une mission sur l'année universitaire 2021-2022 est prévue, initiée par un stage durant l'été 2021, sur la question des besoins fondamentaux du transport aérien.

Dans ce contexte de crise majeure où certains appellent à un changement radical des modèles économiques, il semble plus nécessaire que jamais de revoir certains des fondements du transport aérien, considérés comme acquis pendant des décennies et jamais remis en cause depuis lors malgré la connaissance et la prise de conscience croissantes de l'urgence climatique, pour préparer l'avenir. Prédire l'avenir n'est tout simplement pas possible. Cependant, il est essentiel d'y réfléchir, en particulier à certaines des questions qui nécessiteront inévitablement des changements dans le domaine de

5. Enjeux Sociétaux du transport aérien Team

6. fédération de recherche ONERA / ENAC / ISAE-SUPAERO

l'aviation, sans aucun déni ni tabou, pour s'y préparer. Bien que la croissance permanente du trafic aérien ne soit pas durable du point de vue du changement climatique, aucune inflexion réelle n'a été observée au cours des dernières décennies. Le trafic continue d'augmenter à un taux annuel moyen de 6 %, ce qui fait que le trafic a doublé tous les 15 ans depuis 1977 (source OACI). Néanmoins, selon les sources de l'IATA, le trafic mondial de passagers pour l'ensemble de l'année 2019 indique que la demande (passagers kilomètres payants) a augmenté de 4,2 % par rapport à 2018. C'est 3,1 points de moins qu'en 2018 et surtout, c'est la première fois depuis la crise financière de 2009 que la croissance du secteur des passagers est inférieure à la tendance à long terme d'une croissance annuelle d'environ 5,5 %. Or, si l'on en croit le rapport Sup'Aéro Décarbo pour le Shift Project [Pro21], même le scénario le plus optimiste sur les progrès technologiques et la réactivité du secteur aérien ne permet qu'à peine d'atteindre l'objectif non négociable de 1,5 degrés d'ici à 2050 qui implique un budget carbone de 1170 Giga tonnes pour l'ensemble des activités humaines.

L'objectif de la mission est d'étudier les besoins fondamentaux de mobilité aérienne en s'appuyant certes sur l'état actuel de la société mais surtout en analysant ces besoins au regard d'un équilibre global et de ce qui peut être considéré comme essentiel pour les humains. Sont envisagés comme importants autant les besoins en termes d'usage (privé ou professionnel) que les besoins économiques et les besoins d'imaginaire ou de créativité technique. La réflexion sur ces questions amènera ainsi à interroger sur certains cadres, notamment la dimension humaine du développement technologique, ou encore la potentielle corrélation entre les besoins d'activité humaine et la destruction de l'écosystème terrestre. L'objectif est aussi, sur la base de cette étude, de concevoir des représentations des futurs possibles et des méthodes pour y parvenir. Les formes de représentations possibles sont ouvertes, cela peut consister en des récits [dsed20], représentations graphique ou vidéo, pièce de théâtre [Lat13], maquettes d'objets techniques, jeu, etc ... à voir selon les profils et préférences des étudiants. Cette mission pourrait éventuellement donner suite à un thèse démarrant à l'automne 2022.

L'IHM utilise un concept de besoin qui est rarement confronté à une réflexion sur les hiérarchies de besoins. L'analyse proposée par Keinonen [Kei08], qui distingue les besoins comme désirs, les besoins instrumentaux, qui sont des conditions nécessaires pour atteindre quelque chose qui est ou n'est pas important pour les utilisateurs, et les besoins fondamentaux. Notamment, les analyses de besoins et d'utilisabilité dans la démarche centrée utilisateur

peuvent souvent être analysées comme des besoins instrumentaux.

Chaire design

Je coordonne avec Sylvain Pauchet un projet de chaire intitulé "Sustainable Mobility Innovation By Design" dont l'objectif est de développer la culture et les approches "design" à l'ENAC. Ce projet reconnaît le défi de concevoir les processus d'ingénierie et de management en interdépendance disciplinaire et en lien contextuel avec tous les environnements requis pour les projets de transition face au paradigme culturel classique de l'hyperspécialisation. Les compétences nouvelles qu'il est proposé d'apporter par la culture design sont ainsi l'approche par vision, la synergie complexe utilisant les concepts et les outils dans plusieurs domaines, la capacité de relier pour comprendre, d'ouvrir et explorer des espaces de conception, de gérer des niveaux de définition hétérogènes, dans une recherche de sens interdisciplinaire et un souci des proportions et des équilibres.

Thèse ingénierie et design

Le problème proposé part d'une constatation : dans les réflexions sur la rationalisation du design (design comme science ou design scientifique), tout autant que dans les réflexions scientifiques sur le phénomène du design (sciences du design), une place insuffisante est laissée à la dimension de l'ingénierie système, et ce, même à travers le prisme de l'ingénierie des systèmes interactifs, qui aura au moins partiellement hérité des méthodes de conception des designers, comme en attestent les projets décrits dans ce document, avec le projet Airtius en particulier (section E.1.7).

L'originalité de la thèse proposée par rapport à l'état de l'art en conception et en ingénierie des systèmes interactifs est de s'appuyer d'un point de vue théorique sur le domaine des sciences du design [Sté15], assez rarement invoqué du point de vue de la conception de systèmes interactifs. Dans ce domaine, il est en effet devenu plus fréquent de faire appel aux méthodes de design ainsi qu'à des designers professionnels, mais sans que cela s'accompagne pour autant d'une contribution scientifique dans ce domaine.

La contribution scientifique envisagée serait ainsi une analyse descriptive en vue d'une meilleure compréhension du processus d'ingénierie. Il est suggéré que cette analyse s'appuie sur un processus concret, un cas d'étude qui prototyperait une combinaison des approches design et ingénierie (une

contribution associée consisterait donc dans ce prototype méthodologique). L'objet de l'analyse proposée étant un processus de conception technique, et plus généralement socio-technique, les domaines théoriques secondaires sur lesquels la thèse pourra s'appuyer sont divers. Cela peut inclure par exemple les sciences cognitives, les SHS ou la philosophie de la technique et de l'invention [Sim08].

Outils et concepts pour la complexité

Le dernier point, mais non le moins important, est le développement d'outils pour accompagner nos démarches "en complexité". J'ai commencé une collaboration depuis quelques années avec Thierry Druot, enseignant-chercheur à l'ENAC détaché d'Airbus, à travers le co-encadrement de projets futuristes pour les étudiants, tel un projet de voyages lents dans des avions propulsés par les vents [CLT18].

S'il existe de nombreux outils permettant la simulation systémique, tels que les outils de modélisation de systèmes dynamiques (Analytica, AnyLogic, NetLogo, Simulink, etc), nous souhaiterions néanmoins expérimenter l'applicabilité du paradigme d'ontologie de processus mise en œuvre dans djnn/smala, conçu à l'ENAC précisément dans l'esprit de "conception orientée-systèmes" [Cha12] [MCC⁺18], pour expérimenter des systèmes complexes autour de l'énergie et de l'économie dans le transport aérien. On conçoit ou on met en interaction des systèmes, que l'on modélise au besoin par des processus, ou le cas échéant par des modèles dérivés (états, flots de données, etc). C'est donc une conception à base de systèmes qui est proposée ou, en acceptant la loi de l'anglicisme, une conception orientée systèmes. Les systèmes étudiés sont en interaction à des niveaux très variés, mais d'une manière qui peut être décrite avec les mêmes concepts théoriques : interaction entre système humain et système informatique, entre composants interactifs que l'on assemble, entre système perceptif et affichage, entre humain, automatisme et procédure, voire entre systèmes homme-machine (le contrôle aérien et l'avion, par exemple).

7.3.5 Une autre transparence

Comme décrit en introduction de cette section, la compétence de l'IHM en complexité est un premier volet. Un autre aspect est une compréhension différente des rapports entre humains et machines. Les sujets évoqués ici au-

tour de cette idée sont des directions potentielles autant pour l'enseignement de l'IHM que pour des questions de recherche à venir.

L'humain partenaire des machines

Dans son ouvrage "Pour un humanisme technologique" [Guc10], Xavier Guchet reprend l'idée de Simondon selon laquelle l'humain dans l'objet technique ce n'est pas sa dimension sociale, son usage, ni même le fait qu'il soit fabriqué par des humains, mais quelque chose de plus originel, dans ses schèmes de fonctionnement, quelque chose de l'ordre du pré-humain. L'objectif qu'il reprend est ainsi de définir une techno-logie, c'est-à-dire une science générale des opérations, une allagmatique⁷, par un principe général des sciences humaines, par une analyse du processus par lequel le rapport vital homme-nature s'est axiomatisé, notamment par la technique (c-a-d objectivé sous la forme d'un système d'opérations de mieux en mieux coordonnées). L'humanisme qui cherche à se définir par cette démarche est celui où le corps social a une pensée de soi comme comprenant des humains et des techniques, avec les techniques font partie du «corps social». Selon Guchet, avec les théories de l'information et la cybernétique, la techno-logie devient l'objet d'une construction organisatrice, avec arrivée d'une réflexivité sociale : la société devient un produit de l'effort humain organisateur.

Ce qui rend cette proposition possible vient d'une certaine conception de la technologie et des valeurs. Bontems l'explique [Bon15] :

En réalisant l'encyclopédisme technologique, la technologie a vocation à réduire l'aliénation au sein du système formé par les hommes et les machines. Ce cycle constitue la définition centrale de la "technologie". Celle-ci débute par l'étude des objets techniques, qui en dégage des schèmes purs n'ayant pas qu'une visée utilitaire, mais aussi épistémologique. Puis elle coordonne ces schèmes selon une organisation rationnelle qui n'est pas celle d'une discipline scientifique, mais qui possède tout de même une

7. Plutôt qu'expliquer une réalité en terme de structures, Simondon la définit donc en terme d'opérations allagmatiques (« L'opération est ce qui fait apparaître une structure ou qui modifie une structure » [Sim05] p.559), c'est-à-dire de transformations dynamiques : « On entrevoit comment le point de vue allagmatique conduit à envisager toute réalité non pas seulement comme structure mais comme être d'individuant et tout être individué non pas comme une substance donnée et subsistant statiquement mais comme devenir, relation, opération, ontogenèse » [Châ08].

dimension méthodologique applicable au raisonnement scientifique. La tension entre ces deux plans de synthèse "œcuménique", technique et scientifique, induit la dimension normative de la réflexion technologique, c'est-à-dire la visée d'une réorganisation de la société qui forment hommes et machines. Cette visée affirme des valeurs sans se référer à une norme idéologique préalable. Car le sens de ce cycle s'éclaire de l'intérieur, dès lors que l'on saisit que son ambition profonde est d'introduire dans la culture un encyclopédisme technologique qui libère l'homme de l'aliénation à laquelle le condamne sa méconnaissance de la technique.

L'essence de ces schèmes ayant valeur technique et épistémologique, dont nous avons déjà parlé au sujet de l'invention, sont inhérents à l'humain comme être vivant, comme le précise Guchet [Guc10] :

Parce que son effort d'objectivation descend jusqu'aux soubassements de notre rapport vital au monde, le technicien touche ce qu'il y a de plus universel en nous. "La technique seule est absolument universalisable parce que ce qui, de l'homme, résonne en elle, est si primitif, si près des conditions de la vie, que tout homme le possède en soi" (Les limites du progrès humain [Sim14b]) [...] Cette proximité de la technique et de la vie doit être comprise à partir d'une indication importante que Simondon donne au sujet de l'invention technique : celle-ci, on l'a dit, n'est pas une opération de l'entendement, elle fait intervenir la vie et ses opérations fondées sur l'existence de relations de causalité récurrente dans le vivant (ce qui permet à l'inventeur d'anticiper de telles relations dans le fonctionnement d'une machine couplée à son milieu associé). Dans cette idée, peu développée au demeurant par Simondon, qu'il y a une sorte de projection inconsciente de l'organique dans l'invention technique, Simondon témoigne, on l'a dit, de l'impression qu'ont exercée sur lui le texte de Canguilhem "Machine et organisme" et, par delà Canguilhem, la théorie de la projection organique formulée par Kapp.

Pour cela, Guchet souligne avec Simondon l'importance d'un investissement culturel mais aussi pédagogique⁸ dans un niveau affectivo-émotif :

8. Simondon enseignait la philosophie, mais aussi la technologie, et essayait auprès d'élèves de collège de leur faire appréhender les objets techniques autrement que comme esclaves ou comme moyens de jeu.

C'est prioritairement au niveau de l'affectivo-émotivité, sous les représentations rationnelles de la science et sous les visées pratiques, que peut s'instaurer un [tel⁹] rapport aux objets techniques. Simondon explique dans "Psycho-sociologie de la technicité" [Sim14c] quelles sont les conditions psychosociales nécessaires à la création de cette anticipation affectivo-émotive : "L'affectivité et l'émotivité, multifformes, apportent leur pouvoir de ronnement (? TODO) et leur dimension de participation collective aux instruments et aux objets techniques, particulièrement lorsque ces derniers mettent l'homme en communication avec des ordres de grandeur inusités [...]".

C'est à ce titre que j'ai proposé à l'ENAC d'investir dans des activités d'enseignement permettant aux étudiants de redevenir les *inventeurs* d'un autre futur du transport aérien, et non plus simplement les rouages d'une industrie certes ébranlée profondément, surtout depuis la pandémie du COVID, mais néanmoins encore incapable de se repenser profondément. Réinvestir l'émotion, l'affectivité, c'est réinvestir le sens : c'est un des objectifs de la chaire design et du travail sur les besoins fondamentaux décrits ci-dessus (section 7.3.4).

Cette vision de la technologie tendue vers la transformation - car la culture technique est une découverte du pouvoir de transformation, pas une normativité sociale - et respectant ce qu'elle a d'originare en l'humain, me semble fournir un horizon où, à condition d'adopter plus avant une approche complexe dont elle a déjà la pratique, l'IHM peut développer, grâce à ce qui est tout de même sa spécialité comme discipline, un meilleur partenariat avec l'humain, comme condition pour contribuer à "une réorganisation de la société qui forment hommes et machines". Le risque, bien sûr, est réduire la société à un type de machine particulier, c'est le danger du technicisme dont le seul idéal est l'homéostasie, l'équilibre stable des forces en présence [Com99]. Le seul moyen de l'éviter est bien d'étudier la technicité des objets en tant que mode de relation de l'homme au monde. Cette approche passe également par une relation avec la technique sans séparation utilisateur/machine, et sans coupure utilisation-conception.

9. net et non aliéné

Le design qui cache

On peut citer deux façons très différentes d'être transparent pour une technologie [Wil14] : il y a la transparence de l'outil dans l'utilisation (e.g. Zuhand de Heidegger [Hei27] ou relation incarnée de Don Ihde [Ihd79]), et la transparence de l'outil comme outil dont les mécanismes internes ne sont pas cachés, d'où la métaphore de "boîte blanche" par opposition à "boîte noire". C'est ce que Borgman dénonce comme "device paradigm", où, en opposant appareil (device) et chose (thing), il dénonce le *désengagement* que permettent les appareils (ex : cheminée/chauffage central) [Bor84]. Pour expliquer pourquoi les appareils sont désengageants et pourquoi notre consommation de ces appareils est finalement décevante, Borgmann souligne le fait qu'un appareil dissimule généralement ses mécanismes. Dans l'ouvrage "Simondon ou l'invention du futur" [Bon16a], Carrozzini mais aussi Loeve suggère d'envisager la dimension techno-esthétique - donc la partie "techno" du concept" pour un "design de dispositifs rendant à la fois sensibles et intelligibles des processus que le système technique a coutume de dissimuler : le débit et la localisation des paquets de données circulant sur les réseaux informatiques, la consommation d'énergie que représente une requête sur le web, les ondes électromagnétiques, les communications entre objets distribués, le fonctionnement des circuits de nos ordinateurs, etc" [Car16b] et [Loe16]. Simondon distingue ainsi l'objet technique fermé, qui "empêche de lire en lui l'opération constructrice" de l'objet technique ouvert, dont la technicité est apparente, autorisant la reprise au niveau de l'élément, de la pièce détachée accessible dans la mise en réseau de dépositaires [Sim14e], chap. 2. Etablir par induction une science des opérations techniques interactives évoquée au chapitre 2 (section 2.7.4) faciliterait la mise en œuvre de cette transparence (cela pourrait faire l'objet d'une thèse).

Ferrarato [Fer19] mets ainsi en avant la technicité propre à la couche immatérielle de l'individu technique logiciel : par l'open source, c'est par la possibilité de bricolage que se traduit la marge d'indétermination de cet objet. Ferrarato décrit le bricolage comme une prise de forme assez proche de la version révisée par Simondon de l'hylémorphisme : c'est un dialogue avec la matière, c'est-à-dire avec les éléments logiciels préexistants, qui permet de transformer le logiciel en fonction de schèmes virtuels différents (eidos). Intervenant au niveau de l'élément, il est partie prenante de la genèse de l'objet technique logiciel [Fer19]. Par sa matérialité, le bricolage réduit aussi la distance entre production et utilisation, reposant sur l'adualisme primaire

que nous avons déjà évoqué entre les schèmes techniques de l'imagination et de l'objet technique (cf sections 2.7.3 et 6.3.2).

Le mouvement "undesign" est aujourd'hui présent en design, mais encore assez silencieux en IHM. Cette invisibilité technique est sous-jacente dans l'un des principes centraux de la conception d'IHM qui recommande de cacher la complexité accidentelle à l'utilisateur, principe qu'il est peut-être pertinent de questionner un peu. Dans un article de blog intitulé "Internet doit-il disparaître?" , Régnault, face à la déclaration d'Eric Schmidt, ex-président exécutif de Google, sur le développement des l'Internet of Things (un désastre écologique), propose une critique de la fluidité [Rég06b] :

Or en liquéfiant ce rapport à la technologie et au numérique (ce qui en soi n'est ni bon ni mauvais, c'est juste le cours des choses), nous oublions que nous y avons recours. Nous intégrons la technologie comme si elle était un organe supplémentaire. En cela, nous dissolvons bien internet dans nos usages.

L'article associé "Rendre visible l'invisible" [Rég06a] propose notamment, citant Simondon, de réinventer le rapport à la technique, et donc à Internet, en le basant sur la collaboration et la relation¹⁰ avec le milieu qu'il est devenu.

7.3.6 Interaction et conception (3) : l'interaction citoyenne

Le troisième volet que j'ai annoncé en introduction de cette section sur IHM et écologie est celui d'une interaction citoyenne, dans un sens très précis, qui est de surpasser la "coupure artificielle entre la construction et l'utilisation" [Guc10]. Cette question a parcouru tout ce manuscrit (e.g 2.7.5, 6.3.4, 6.1.3), je n'y reviens pas ici, mais je souhaite évoquer un exemple qui montre très clairement que utiliser et concevoir sont sur un même plan en termes d'évolution "technologique" (ici socio-technique, mais il n'y a pas de différence) : le futur du transport aérien. Il y a une débat idéologique entre les cadres et ingénieurs aéronautiques qui pensent qu'il y a des solutions technologiques à la crise climatique (moteurs, carburants, etc), et ceux qui pensent qu'il faut faire baisser le trafic. Du fait de ce débat assez clivant, les deux se combinent rarement *sur le même plan* dans les études, alors que les deux peuvent faire l'objet d'un *design*. Je soupçonne que ce clivage soit un écho de

¹⁰. Relation » utilisé ici au sens que lui donne Gilbert Simondon : « L'objet (?) est une relation avec un milieu qu'il contribue à moduler ». [Sim58]

la coupure évoquée, avec le trafic du côté de l'utilisation, et les technologies du côté de la construction. Les études du Shift project ne placent pas les deux sur le même plan non plus. Elles étudient deux scénarios qui font varier un certain nombre de paramètres¹¹ mais pas celui du trafic : un scénario optimiste (Maverick), et un scénario pessimiste (Iceman), et ce, avec une hypothèse de progrès technologique maximum. Le résultat de ces analyses, si les deux scénarios permettent d'infléchir significativement la courbe des émissions, est que aucun des deux n'est compatible avec le budget carbone dans l'hypothèse d'une croissance de trafic de 4% par an. Au-delà des incertitudes qui pèsent sur la réalisation des objectifs technologiques du secteur, la vitesse de diffusion des innovations dans la flotte est trop faible au regard de l'urgence climatique (la date de consommation du budget carbone est 2041 pour Maverick, 2034 pour Iceman). Mais il n'y a pas de paramètres faisant varier le trafic, la seule hypothèse précisée est le retour 4% de croissance du trafic à partir de 2024) [Pro21].

Il s'agit à mon sens à nouveau d'une position binaire entre invention et usage, alors qu'en fait l'usage peut tout à fait faire l'objet d'une conception. Ce serait réinventer le trafic aérien, ce dont il est fait, ses besoins, ses finalités, son fonctionnement. Dans cette ré-invention il ne s'agit d'ailleurs pas que d'usage, mais aussi de conception technique, socio-technique, et cette conception est participative (cf la honte de l'avion). Cette opposition traduit une opposition entre objet et système, entre extension prothétique et technique dissoute dans le savoir-faire méthodologique et organisationnel. C'est aussi l'opposition entre deux formes de complexité : l'une liée aux mécanismes physiques du côté de la machine, l'autre liée aux mécanismes sociaux, organisationnels, économiques. C'est enfin l'opposition entre deux domaines de savoir différents, qu'il faudrait pouvoir recombinaisonner.

Ce serait en aéronautique la re-conception d'un système socio-technique fait de procédures, d'organisation des territoires, d'économie, de formations, de pratiques. Avec l'ISAE qui est du côté des objets-machines, on peut même dire que c'est la force de l'ENAC d'être du côté des systèmes socio-techniques. La proposition serait ainsi de ne pas rester dans le réactif face à des contraintes environnementales, physiques et techniques (la réaction sociale et comment l'intégrer), mais d'avancer dans la construction et la conception du côté des systèmes socio-techniques. C'est ce que nous avons

11. les calendriers, les budgets carbone dédiés à l'aérien sur un budget carbone global donné non négociable, et les hypothèses de répartition des carburants écologiques

modestement commencé à faire avec les divers stages et projets étudiants, en mesurant la difficulté de l'entreprise. C'est la raison des diverses initiatives lancées ces derniers temps et décrites dans ce chapitre. Le projet est titanesque : il faut travailler du côté procédures, travail qui a commencé à la DSNA avec Thalès, travailler sur l'organisation des territoires, sur les modèles économiques, la formation, les pratiques. Travailler sur l'usage est un vaste programme, qui se commence d'ailleurs en silence petit à petit en ce moment, qui exige un effort pluri-disciplinaire considérable : il faudrait des économistes pour construire des scénarios économiques (je dis scénario plutôt que modèle, pour souligner l'aspect inventif), il faudrait des urbanistes pour travailler sur les espaces, les territoires, les connexions, les flux, il faudrait des spécialistes des aéroports pour dessiner les aéroports dans cet espace, il faudrait des spécialistes du trafic arien pour imaginer des règles différentes d'usage du ciel, il faudrait des spécialistes de l'énergie pour configurer les ressources de manière circulaire.

Si nous acceptons de parler de technologie "centrée humain", la phrase de Simondon [Sim58], citée en 2016 par Minier et Bontems [Bon16b][MB16] :

La machine est ce par quoi l'homme s'oppose à la mort de l'univers. Elle ralentit, comme la vie, la dégradation de l'énergie, et devient stabilisatrice du monde.

peut-elle résonner comme un espoir? La réforme est bien technique, et consiste à réintégrer la technique dans la culture parmi les autres types de médiations (morale, esthétique, scientifique, ...), sans qu'il soit question de techniciser la société.

7.4 Résumé

Ce chapitre expose trois directions de recherche, l'une visant à proposer un concept décrivant les propriétés des interfaces comme traversée, et par là incluant les interfaces avec ou sans surface, la seconde concernant les liens entre philosophie et IHM, et la troisième proposant un programme pour l'IHM et l'écologie reposant sur l'IHM comme approche complexe. Les deux dernières directions sont complémentaires, un approfondissement philosophique de l'IHM ne pouvant qu'appuyer une approche écologique.

Chapitre 8

Conclusion

Ce manuscrit propose, sur la base d'un exposé réflexif des travaux de recherche effectués depuis ma thèse, une conceptualisation de l'interaction qui permette d'envisager une approche complexe de la conception des systèmes interactifs et de la relation humain-machine, dont l'objectif, peut-être naïf, peut-être utopique, sûrement ambitieux, serait de contribuer à une technologie différente.

Les travaux présentés se répartissent en un certain nombre de thèmes intéressant soit l'interaction, avec l'écriture interactive, l'interaction tangible, la conscience mutuelle dans la collaboration séparée, soit la conception. A travers les thèmes concernant l'interaction, j'ai voulu illustrer différents aspects de la matérialité, dont la problématique a été introduite dans le chapitre sur l'état de l'art. Ce qui se dessine dans ce questionnement de la matérialité, questionnement assumé comme imparfait, ce sont les liens entre interaction et conception, l'interaction s'effectuant à travers des opérations et des schèmes communs à ceux de la conception. A travers le thème de la conception, j'ai à l'inverse souhaité interroger son fonctionnement opératoire à partir d'exemples, et comment ce dernier s'enracine dans l'interaction, voir même dans une motricité primaire. Par rapport aux propositions théoriques de Simondon sur ce qui ne s'appelait pas encore l'IHM, propositions sur lesquelles, entre autres, je m'appuie beaucoup dans ce mémoire, il me semble que l'IHM d'aujourd'hui peut proposer une approche encore plus efficace de l'individuation technique à travers l'action dans la conception, en incluant la conception participative d'un point de vue théorique.

Cet exposé visait à légitimer l'IHM comme une contribution originale à la science des opérations qui nourrit le projet d'encyclopédie de Simondon,

sans pour autant se limiter à cette philosophie, qui d'ailleurs ne cesse de se ré-individuer aujourd'hui. La thèse de l'encyclopédie est surtout invoquée comme un socle théorique permettant de comprendre les relations humains-techniques, spécialité de l'IHM, cette compréhension humaniste *et* technologique permettant d'envisager par une approche complexe les transformations qui sont nécessaires aujourd'hui.

Appendices

Annexe A

Analyses de l'écriture

A.1 Geste et écriture musicale

Cette annexe complète la section 3.2.1.

Relation physique au papier. L'écriture, notamment l'écriture de la musique, est souvent décrite sous son aspect d'opération physique, de relation physique à la page, comme à un interlocuteur. MS évoque l'importance du "feeling de la pression" du stylo sur la feuille, et remarque que "l'écran est fragile", et qu'"on ne peut pas s'appuyer dessus". Alors qu'il donne son opinion sur le logiciel Finale, XD, par analogie avec l'écriture manuscrite, critique en l'aspect directif : avec certains logiciels "on est quand même victime... enfin ... on rentre dans un tracé. A la main, on a moins l'impression de rentrer dans quelque chose de programmé avant nous". Cette expression évoque bien un geste, un mouvement physique, qui crée un chemin. ML souligne l'importance du feeling : "On sous-estime souvent l'impact des choses quotidiennes, le feeling du stylo, le confort, la hauteur, l'ergonomie." et MS souligne l'importance de la position du corps par rapport à l'écran : "L'écran est fragile, on ne peut pas s'appuyer dessus". Ce n'est pas seulement le matériau papier qui joue un rôle crucial, mais aussi les *objets* faits de papier : les feuilles, cahiers, etc. plus ou moins formels ou structurés. La nature tangible du papier comme objet qu'on peut disposer et personnaliser à loisir pour "porter" des idées est illustrée par un témoignage de Johannes Maria Staud [GKL⁺07]. Ce compositeur décrit sa procédure habituelle de travail, qui consiste à utiliser cinq feuilles avec pour chacune un rôle bien précis : une première feuille

contient des accords préalablement joués au piano, une deuxième une cellule rythmique et ses dérivées, une troisième un plan de disposition spatial, une quatrième une courte ligne mélodique ou des préférences intervalliques et enfin une cinquième quelques graphiques relatifs au plan général. Il profite aussi avantageusement de cette propriété de support simple d'accès et omniprésent du papier : ses notes sont prises sur le papier qui est disponible au moment où les idées viennent : une page à la fin d'un livre, sur un petit carnet (mais aussi sur un téléphone portable s'il n'a pas de papier sur lui !). Bruno Mantovani raconte quant à lui, qu'il note ses idées "sur le premier papier qui passe entre ses mains", comme un débris d'enveloppe.

Dessiner la musique. Une majorité de compositeurs rencontrés avait pourtant à disposition une tablette graphique, ou du moins en avait fait l'expérience, mais aucun d'entre eux ne semblait l'utiliser pour le travail de création. Certains l'ont essayé mais en sont restés là (MM), d'autres comme XD, ne l'utilisent que pendant les performances. MS reproche à ce dispositif de ne pas permettre de voir ce que l'on écrit.

L'utilisation des courbes, projetant souvent leur sens mathématique dans un espace inattendu, e.g., courbes coupées pour créer des durées (KH), pour définir une maquette (MS), s'est souvent avérée une nouvelle occasion de constater une concurrence entre le tracé à la main et les outils d'affichage et d'édition. Il existe notamment dans Open Music [AADR98] un outil nommé BPF qui permet de définir, éditer et afficher des courbes. Il y avait par conséquent souvent redondance entre la courbe manuscrite, à l'origine de l'idée, et sa version informatique, au départ simple recopie, induisant donc une certaine perte de temps. MS a donné un exemple de courbes permettant de définir des enveloppes (fig. 3.2.1.b) en insistant sur le fait que ce dessin serait de toutes façons d'abord fait sur le papier, puis ensuite recopié sur l'outil.

A.2 Persistance de l'écriture

Cette annexe complète la section 3.3.4.

Le papier mieux que l'ordinateur Sur l'échelle allant du programmé à l'interactif, on observe chez les compositeurs une répartition des rôles un peu inhabituelle entre le travail qui se fait sur le papier et celui qui se fait sur

un ordinateur. L'ordinateur, ordinairement plus réservé à la rationalisation, à l'organisation ou à la programmation est plutôt utilisé comme un "brouillon" pour laisser surgir des possibilités. Ainsi, pour GN, réalisateur musical assistant de XD, c'est même l'équivalent d'un cahier de brouillon pour explorer les idées : [...] par exemple j'ai entendu un son de guitare très riche en harmoniques qui m'a fait penser à un son de tampinga indien. J'ai alors décidé de l'accorder tout en perpétuant un mouvement des résonances imitant les résonances sympathiques du tampinga. On utilise ainsi l'informatique comme un papier/crayon sophistiqué pour expérimenter rapidement une idée musicale. A l'inverse, le papier, s'il est certes aussi utilisé pour ébaucher des idées, est souvent revendiqué comme un médium indispensable pour arrêter l'exploration, fixer quelque chose, prendre une décision. Le papier, en tant que partenaire de l'écriture musicale, et si l'on considère qu'une partition est un programme, est donc aussi un support de programmation. Nous avons même rencontré des cas de programmation de résonateurs à l'aide d'une notation musicale classique (XD) : "Du coup je peux écrire une partition de résonateurs, qui seront joués par un musicien, après sans être à l'IRCAM." A contrario, l'ordinateur représente la variété des possibles, les explorations dans lesquelles on ne sait pas toujours quand s'arrêter.

Les figures du papier comme support de fixation d'un état sont nombreuses. Pour KH, "sur le papier, c'est fixé, c'est un état d'achèvement". Certains compositeurs font de nombreuses photocopies, dont le rôle est à la fois de constituer un aide-mémoire, mais aussi de fixer des possibles qui sinon s'échapperaient. MS, commentant une page d'un cahier Anoto avec laquelle nous avons monté une petite expérience (voir plus loin la description des premiers prototypes) : "Le travail est hiérarchique, on a envie de le fixer, de ré-écrire dessus. C'est intéressant de ne pas pouvoir effacer ce qui est dessus (si c'est une photocopie)." A cette possibilité de fixer, s'oppose l'ordinateur, offrant de multiples possibles avec une plus grande difficulté pour prendre une décision et s'arrêter. ML explique ainsi que : "L'ordinateur est plus pratique pour gérer plusieurs versions, mais le problème c'est qu'on a toujours envie de revoir (modifier) la pièce...". Nous avons d'ailleurs pu constater cette difficulté à mémoriser un état sur l'ordinateur lors de l'entretien avec XD et GN à propos du logiciel Max/MSP : "Il y a des éléments pour appeler des presets [...]. Mais ça ne fait pas très longtemps dans Max qu'on peut fixer de manière un peu complète les éléments qui sont programmés, parce que c'est toujours un peu compliqué de faire une photographie d'un état, parce que ça dépend de l'état, mais ... ça commence." Le gros avantage du papier ou

de la photocopie, c'est en effet de pouvoir "enregistrer" sans réfléchir : "La photocopie : c'est le cas de figure où on ne veut pas réfléchir (tout de suite) à ce qui est gardé. C'est très différent avec la recopie à la main, où on décide."

Volatilité de la réflexion scientifique La volatilité aussi bien des interactions avec l'ordinateur que des discussions scientifiques avec les collègues (A.1.a) est le problème central auquel la pratique du cahier de laboratoire est censé faire face. CM, quand il travaille seul, prend soin de retracer les principales étapes de ses interactions avec l'ordinateur. Mais quand, lors d'une discussion avec le responsable du laboratoire, il doit essayer à sa suggestion un certain nombre d'outils, il ne peut pas se souvenir de tout (A.1.b). Comme l'exprime OS, "l'informatique ça s'évapore", et il faut garder des logs de ce qui se passe, des commandes qui ont servi à produire tel et tel résultat. Le défaut actuel de structure d'accueil a pour conséquence directe cette perte d'information. Comme le dit AV à propos d'une discussion cruciale pour la suite de son projet : "La conclusion était carrément inexistante. Sur le moment elle l'a été et puis on l'a stocké nulle part".

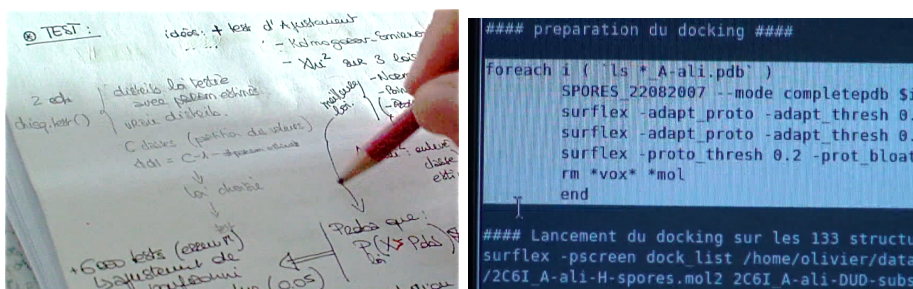


FIGURE A.1 – Discuter, interagir : des données volatiles. (a) une tentative de trace d'une discussion entre JB et sa responsable (b) enregistrement d'une exploration dans un script.

A.3 Mise en relation dans la dimension temporelle

Cette annexe complète la section 3.4.

La spatialisation des flux temporels permet également une mise en relation des informations par une vision globale qu'elle apporte. Nous l'avons

A.3. MISE EN RELATION DANS LA DIMENSION TEMPORELLE 197

observé à travers l'utilisation des outils de mise en relation dans le temps des informations sur l'activité : nous avons ainsi proposé d'insérer une timeline parmi les outils de rédaction du *blog*, ainsi que la possibilité de relier les articles au sein d'un fil d'activité.

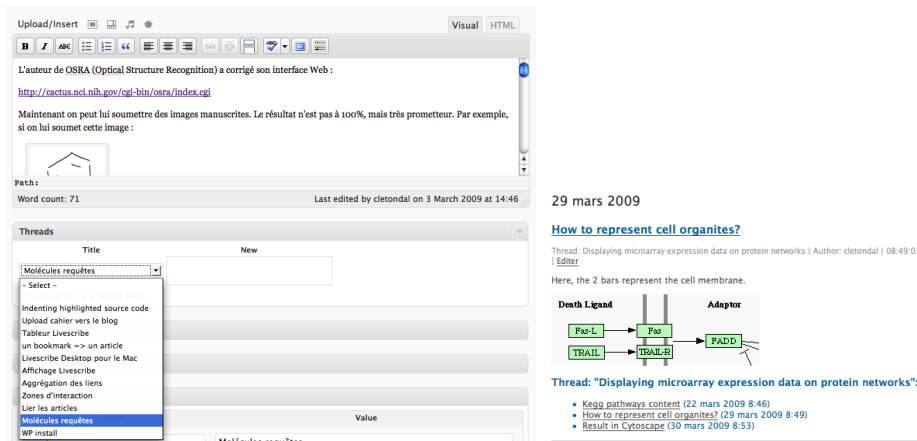


FIGURE A.2 – re-blog : fil d'activité (*threads*) : (a) menu des *threads* courantes. (b) affichage des articles de la *thread* associée d'un article.

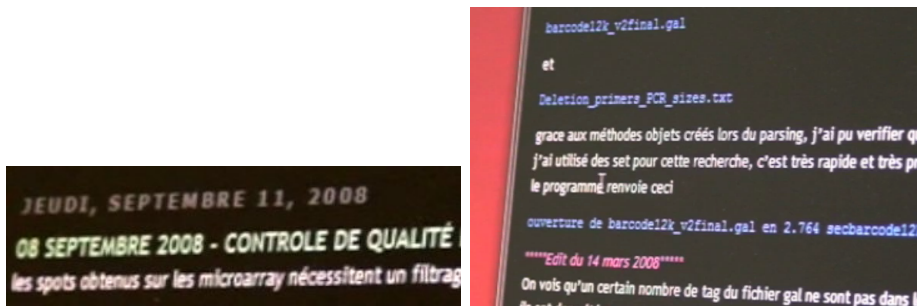


FIGURE A.3 – (a) Décalage entre la date d'écriture et la date de rédaction. (b) Mentions explicites des éditions d'un article et de leur date.

Nous avons proposé aux participants une timeline intégrée à l'outil de rédaction (fig. A.4) et un outil de suivi d'activité qui permet d'éviter de rééditer un article (fig. A.3.b) pour rendre compte des étapes d'un projet ou d'une expérience, et par lequel les biologistes peuvent relier chronologiquement les articles à travers la création de "threads", qu'on pourrait appeler

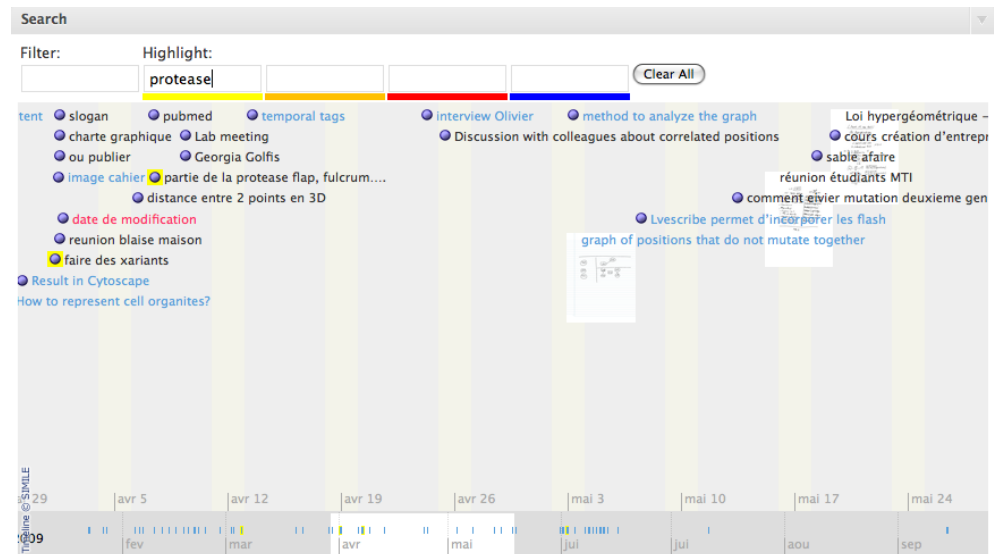


FIGURE A.4 – Timeline : visualisation globale des articles sur une échelle temporelle avec fonctions de filtrage ou de soulignement (ici les articles faisant référence aux protéases sont surlignés en jaune). Une vignette est affichée à côté des articles ayant une page Livescribe attachée. Le défilement dans la timeline peut s’effectuer à deux échelles : les semaines (barre principale du dessus) ou les mois (barre plus mince du dessous).

“fils de discussions” si ce n’est qu’il s’agit plutôt de discussions avec soi-même (figure A.2).

Annexe B

Analyses Strip'TIC

Cette annexe complète la section 4.2.

B.1 Structure des processus temporels dans l'ATC

Pour les contrôleurs aériens, la sécurité consiste à gérer des événements temporels : les avions arrivent à destination ou décollent à des heures données. Une partie essentielle de la tâche du contrôleur consiste à gérer ces événements en temps réel en parlant aux pilotes pour leur donner des autorisations (clearances) de direction, de vitesse et d'altitude. Une autre tâche critique est d'être complètement préparé à assurer le bon déroulement de ces actions en temps réel. Loft et [LSNM07] décrit l'activité ATC comme une combinaison subtile de deux modes de contrôle : 1) un mode proactif qui consiste - souvent pour le contrôleur organique - à construire un encodage efficace des problèmes potentiels de trafic afin de pouvoir les résoudre très rapidement et sans erreurs, et 2) un mode réactif, à la charge du contrôleur tactique, qui consiste à réagir aux événements (appels des pilotes, vols quittant le secteur et conflits potentiels). Ces deux modes existent en parallèle mais à des échelles de temps différentes. Comme l'explique un contrôleur : "Le tactique [...] s'occupe d'un problème à 15 milles nautiques (environ 30 km, parcourus en 3 minutes) alors que là [pour l'organique] nous parlons ici d'un conflit qui va se produire dans 15 minutes" (disons 200 km environ selon les avions). Le mode proactif est lié à l'encodage des données (intégration des strips, préparation de la séquence d'arrivée en approche), aux tâches de

gestion des transitions dans l'activité (dégrouper de secteur, remplacement d'équipe), mais aussi à l'encodage des problèmes (filtrage, visualisation, recherches, annotations et ré-arrangements spécifiques aux strips). Le mode réactif, caractérisé par des changements de contexte rapides où les données nécessaires à la résolution des problèmes doivent être à portée de main, est celui des actions et des décisions. De manière générale, l'activité ATC implique ainsi un phasage constant entre deux domaines temporels : celui des contrôleurs, lié à l'organisation de leur travail, et le temps réel du trafic aérien.

B.2 Encodage physique des processus temporels

Ce que Kirsh [Kir95] décrit comme des représentations externes permet de décharger la mémoire. De plus, elles aident à construire des références persistantes aux informations internes, qui peuvent être réarrangés pour percevoir des aspects qui étaient difficiles à détecter et pour améliorer la perception des relations sémantiquement pertinentes. Kirsh décrit comment des experts se servent des dispositions spatiales pour des tâches comportant une phase de préparation en vue d'une phase d'exécution rapide [Kir95]. Ils doivent notamment pouvoir s'assurer de la disponibilité des informations nécessaires, et de la possibilité d'exécuter les actions presque automatiquement. Dans cet objectif, ils pré-structurent physiquement leur espace de travail pour simplifier les choix, écarter les décisions non pertinentes, encoder les conditions préalables et mettre en évidence les actions suivantes. Pour Kirsh, l'espace permet d'encoder les séquences linéaires par exemple pour mettre en évidence l'ordre de leur utilisation. Typiquement, ces séquences existent dans le contrôle d'approche pour les stacks et les séquences d'arrivée. Harper et al [HH91] soulignent comment ces arrangements de strips, qui sont censés représenter des avions, encodent en fait une liste ordonnée de tâches à accomplir : "ATCO work is not like an assembly line in which a recurrent sequence of steps has to be followed through, but one in which the work consists of putting the tasks to be done into a sequence of steps that can be followed through. This is how the ATCO is looking at the information presented in the strips, the radar and the R/T ; to see what needs doing 'now', 'in a moment', 'sometime later on', and so on?". Ces ordonnancements spatiaux relient implicitement

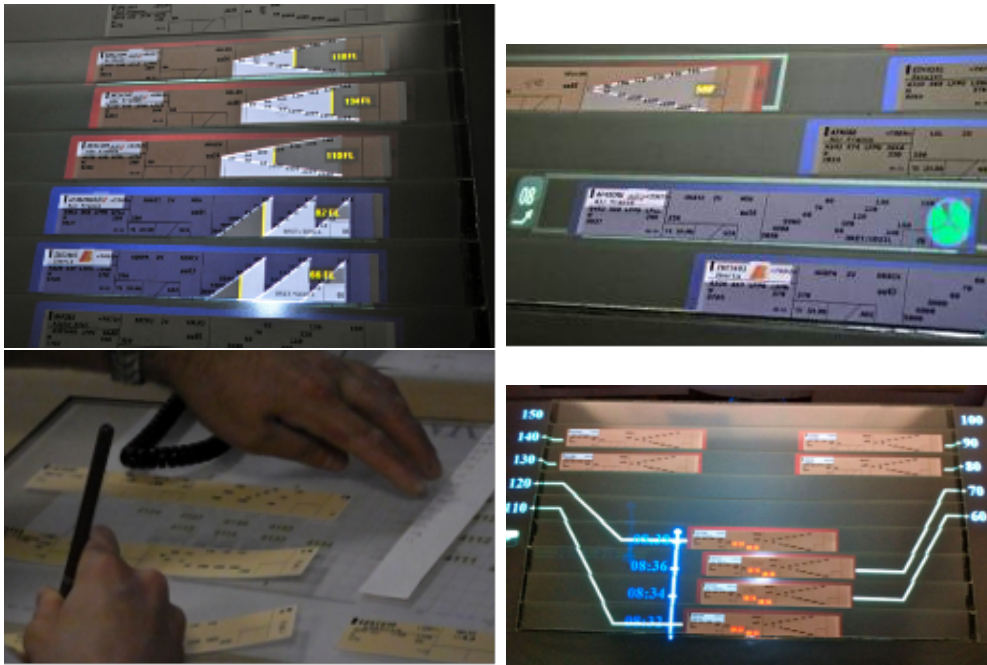


FIGURE B.1 – a) les couleurs (gris clair, jaune, gris foncés) indiquent les niveaux de vol passés, présents et futur ; b) timer pour gérer la turbulence de sillage des gros porteurs au décollage (cercle vert) : le vol suivant doit attendre quelques minutes our décoller après le gros porteur AFR608 (heavy (H)) ; c) un brouillon au dos d’un strip pour le calcul mental des heures d’arrivée dans une séquence d’approche à Orly ; d) calcul tangible de cette séquence avec les strips connectés : en bleu des heures d’arrivée, en rouge les heures de sortie de stack ; on voit les strips papier avec un lien vers leur niveau de stack, ce qui permet de visualiser en un coup d’oeil grâce aux croisement les avions qui seraient mal placés.

les deux échelles de temps que nous avons évoquées plus haut : considérées comme des séquences de trafic, elles correspondent aux avions qui volent en temps réel, mais si on les voit comme des tâches à accomplir, elles figurent dans l'échelle de temps du contrôle. Pour être le plus précis possible sur le timing, les contrôleurs s'appuient également sur leur connaissance de la durée des actions, et ce, en fonction de divers contextes (dont leur propre charge cognitive) : "C'est votre horloge interne, vous savez combien de temps il vous faut pour effectuer des actions standard".

B.3 Expérimentation d'outils temporels mixtes

Sur la base de cette analyse, nous avons exploré comment passer de ces relations implicites à une conception plus explicite d'objets temporels [LHL⁺13]. Nous avons conçu et mis en œuvre plusieurs prototypes, dans lesquels des informations temporelles étaient fournies à diverses fins, comme la fonction de "calcul tangible" des horaires de sortie de stack d'une séquence d'approche (fig. B.1.d). La conception de ce prototype s'est inspirée de l'observation en simulateur de l'utilisation par les contrôleurs d'Orly de strips "brouillons", comme d'une sorte de "règle en papier" pour aider à calculer mentalement les créneaux de passage libres pour l'approche (fig. B.1.c). Le principe de l'outil conçu est de permettre au contrôleur de construire des séquences en utilisant les strips papier et d'afficher sur chacun l'heure d'approche prévue (HAP) qui en résulte pour chaque avion. Nous avons également implémenté un outil permettant de calculer le temps nécessaire pour atteindre une balise ou pour effectuer une trajectoire dessinée au stylo sur l'écran radar. De plus, une timeline a été conçue pour analyser des conflits potentiels entre des vols se dirigeant vers une balise commune [GNCG03]. De tels outils sont destinés à ajouter des informations temporelles explicites aux séquences déjà structurés dans l'espace du tableau de strips. Le temps peut également être visualisé dynamiquement avec des informations évolutives, comme un minuteur pour gérer les turbulences de sillage (fig. B.1.b), ou des barres de progression (fig. B.1.a). Selon nous, ce sont des outils qui sont là pour faciliter le phasage entre les deux échelles de temps décrites ci-dessus. Ce que nous avons observé cependant, c'est que les contrôleurs savent très bien s'appuyer sur leurs habiletés incarnées d'organisation spatiale tant pour

B.4. ESPACE DE REPRÉSENTATION ET D'INTERACTION REPOSANT SUR LES STRIPS PHYS

être "en temps réel" que pour l'anticipation. On peut d'ailleurs remarquer qu'en mode anticipation, les contrôleurs d'approche ne s'intéressent en fait pas tant au timing explicite qu'à l'ordonnancement : "On ne se soucie pas de l'heure d'arrivée exacte, ce qui compte c'est qu'ils [les avions] [...] soient dans une séquence suffisamment espacée et cohérente [...] pas trop près, pas trop loin... ". L'un des contrôleurs participant à l'étude avait toutefois particulièrement appréciés ces "augmentations" pour le temps réel et le contrôle tactique, du fait qu'elles aident vraiment à programmer le timing ou les actions. Alors que nous discutons d'une timeline d'arrivée, il a spontanément proposé l'idée d'un compte à rebours [CGBC⁺11] pour déclencher des rappels d'actions : ...10 ...9 ...8 ...0 ...-1 ...-2 ... quelque chose pour faire ressentir et rappeler au contrôleur tactique qu'il est temps d'agir, de donner un ordre au pilote, et même de savoir combien il est 'en arrière' (en retard)". Ce type de timer fait ainsi le lien entre le temps de contrôle et le temps réel en aidant les contrôleurs à planifier leurs actions.

B.4 Espace de représentation et d'interaction reposant sur les strips physiques

Des objets physiques qui représentent des responsabilités sur des vols. Pour le contrôleur, les strips représentent essentiellement les vols qui traversent leur secteur et la responsabilité qui y est associée, en les rendant présents mais à distance, et non les strips virtuels. Les strips papier ne représentent pas non plus les vols affichés sur l'écran radar : les vols sur l'écran et les strips sont des objets différents qui servent des objectifs différents. L'écran radar fournit une vue du trafic en temps réel, tandis que le tableau de strips représente l'état actuel de la réalisation des tâches du contrôleur. En pointant sur un strip, on sélectionne effectivement l'avion correspondant sur l'image radar, mais cela ne constitue qu'une transition visuelle entre des vues complémentaires.

Strip'TIC fournit certes un environnement où les manipulations dans l'espace physique déclenchent des événements dans l'espace virtuel : déplacer les strips sur le tableau déplace les affichages correspondants. Nous pouvons donc identifier ces deux relations décrites dans le modèle MCPrd [UI00] : le strip physique *contrôle* la projection de données numériques, mais *tient lieu* d'une représentation interne. D'un côté, le strip physique agit comme une "fenêtre

d'affichage" tangible pour contrôler la sortie projetée sur le papier (figure 4.4.b). De l'autre, le strip physique agit comme une "poignée cognitive" pour projeter et construire [Kir09] une image mentale de l'état courant de la situation (figure 4.4.c). A travers les manipulations physiques, chacune des deux dimensions participe à la construction d'une image composée une image projetée et d'une image interne. Il est à noter que l'aspect affichage dans des "fenêtres" n'a aucun coût cognitif : les contrôleurs ne sont pas conscients de cette activité de "gestion des fenêtres".

Des objets virtuels qui représentent des objets physiques Les strips "virtuels" projetés sous l'écran, en fonctionnement nominal, servent principalement de feedback lorsque le strip papier est posé sur le tableau, notamment pour montrer qu'il est bien reconnu. Mais pendant les phases où les strips physiques sont absents de la position de contrôle, comme lors d'un dégroupage puisqu'il faut transférer les strips sur une autre position, c'est le strip virtuel qui tient lieu de strip physique, et le contrôleur peut interagir avec ce strip virtuel comme s'il s'agissait du strip physique [GMD⁺14]. Ce rôle est à souligner, car cela illustre le fait que les strips virtuels assurent la redondance et donc la robustesse si l'on ôte strips physiques du tableau. La sémantique des strips virtuels s'appuie potentiellement aussi la connaissance que les contrôleurs ont des strips électroniques.

Implications pour l'allocation de composants physique/virtuel Cette analyse éclaire nos choix d'allocation de fonctions en numérique ou en physique. Comme nous l'avons décrit dans la section précédente, les objets physiques et les manipulations associées ont leur cohérence interne. Ainsi, tant que les objets physiques sont capables de fournir au contrôleur une représentation externe de leurs préoccupations, il n'est pas nécessaire de les surcharger d'informations explicites supplémentaires. Comme décrit ci-dessus, les outils "physiques" permettent un encodage temporel efficace que ce soit des séquences ou de l'horloge interne. En revanche, les données augmentées (fig. 4.4.a) sont là pour fournir une perception en temps réel et des informations dynamiques concernant l'état actuel des vols. Notre analyse aide également à comprendre les problèmes de complexité potentiels qui peuvent poser les nouveaux outils tangibles que nous avons proposés, tels que le "calcul tangible" des temps de sortie de stack, qui ne correspond pas directement aux pratiques actuelles, c'est-à-dire, au moins pour certains contrôleurs, aux

externalisations sur lesquelles ils s'appuient aujourd'hui.

Un espace interactif homogène

La complexité est également gérée à travers les propriétés et le comportement des composants. Plusieurs de nos observations soulignent cet aspect, tant au niveau des dispositifs d'interaction que de la communication homme-système [BBE⁺02]. Les contrôleurs ont souvent souligné l'homogénéité apportée par l'intégration du pattern Anoto sur tout l'espace, fournissant un système adressable de manière unique. Ils ont aussi particulièrement bien réagi au fait que le système les "comprenait" grâce au feedback continu sur les déplacements de strips et la reconnaissance de l'écriture manuscrite. Ce retour d'information continu paraît normal aujourd'hui, mais il est important en environnement tangible pour la compréhension et les attentes des utilisateurs concernant le comportement du système [MPL⁺00] [Hor12]. Le système présente d'autres types de continuité entre physique et numérique. C'est le cas 1) au niveau le strip lui-même, un objet d'emblée mixte puisqu'il combine déjà papier et virtuel (avec informations imprimées, pouvant être réimprimées à la demande) : lorsque des données sont projetées sur la surface du strip, un réglage fin de la luminosité peut produire l'effet d'un rendu composite de données imprimées et projetées. Egaleme nt, avec 2) la fusion des affichages : les données projetées n'occul tent les informations imprimées et vice versa, ce qui renforce cette combinaison transparente des dimensions tangibles et virtuelles. Enfin, la cohérence dans Strip'TIC fonctionne de manière résiliente : il n'est pas nécessaire d'assurer un couplage constant entre les composants physiques et virtuels puisqu'on peut en retirer un strip du tableau sans entraver une utilisation continue du système. De même, une panne au niveau du stylo Anoto n'interrompra pas non plus le système, puisque l'écriture manuscrite fonctionnera toujours.

Annexe C

Analyses Airtius

Cette annexe complète la section 4.3.

C.1 Dimensions physiques de l'activité des pilotes de ligne

Statut distancié du corps et de la perception. En distinguant les situations où le pilote est dans un rôle de surveillance ou dans une phase du vol où le temps est disponible, ce qui se produit typiquement en croisière et les contextes à forte demande d'actions de pilotage actif en temps réel, nous avons compris que les pilotes de ligne apprennent à se fier à une perception indirecte, par les instruments (contrairement aux pilotes VFR), par opposition à perception visuelle du dehors potentiellement illusoire (fig. 4.5.a). Comme l'explique un pilote : "C'est comme on apprend toujours : il faut croire en ton horizon artificiel. Il ne faut pas croire à tes sensations, tu peux avoir une illusion, crois à ton instrument". Cette constatation semble de prime abord très opposée aux principes tangibles, puisque les pilotes font même plutôt confiance aux informations exactes et numériques affichées sur leurs écrans, qu'à une représentation visuelle synthétique (comme un relief sur le ND¹). Le seul sens auquel les pilotes semblent faire confiance est le sens tactile, qui leur permet de différencier les manettes ou les boutons par leur forme : "On sait que le bouton avec les plus grosses

1. ND : navigation display

dents autour on sait que c'est la vitesse". Le corps est distancié aussi, comme un système technique, pourvu de capteurs : "L'atterrissage reste une phase kinesthésique. On n'a pas de capteurs qui vont nous donner des sensations de l'avion, nos propres capteurs c'est nous".

Gestes pour la perception. La perception des informations est décrite par un des pilotes à travers des actions et des gestes pour atteindre et attraper les données, parfois dans un cycle rythmé d'opérations rapides, comme l'illustre cette citation : "en fait quand on dit «on regarde»? on n'a pas besoin d'y passer des heures pour prendre des informations : on sait ce qu'on cherche, on va aller capturer l'information dont on a besoin, c'est comment je suis positionné, et après je vais revenir? c'est ce qu'on apprend en pilotage initial : tu vas chercher ton information, tu la fous dans ta tête, tu reviens sur tes instruments, et tu réfléchis à ce que tu dois faire. " ; où un pilote expliquait cette "saisie" d'information, notamment à propos du balayage des instruments : "musculaire avec les yeux, ça suffira pas ; parce qu'en fait on touche [geste de toucher la console centrale] quand on passe sur les manettes on vérifie qu'elles sont bien là et ici que c'est bien fermé que tous les interrupteurs que tous les boutons poussoirs sont bien en place".

Sensations nécessaires aux actions de pilotage. Contrairement au cas de perception abstraite, le besoin de sensations concrètes est souligné pour les actions impliquant un contrôle intensif, où les pilotes ont besoin de sentir leurs mouvements et leur corps. Dans de telles situations, comme le décrit un pilote, ils ont besoin de "faire corps avec l'avion", de le "sentir". Un pilote l'exprime ainsi : "on avait vraiment une sensation de contrôle [geste de saisie avec la main gauche] il y a tous les sens qui étaient ?? adaptés? [mains ensemble]? à cet avion? et l'aspect extérieur était représenté par l'action sur le mini-manche [actionne le mini-manche]? avec une corrélation avec ce qu'on voit [pointe] ce qu'on sent [main droite doigt tendus sur la jambe] et ce sur quoi on agit [main droite désigne main gauche]."

La communication orale comme extériorisation. La communication orale dans l'activité des pilotes est primordiale et a déjà été largement étudiée (e.g. [Nev01], [HP97], pour en citer quelques-unes). Nous ne nous intéressons ici qu'aux propriétés de la communication orale entre pilotes qui nous semblent pertinentes pour la conception

tangible. Au cours des entretiens, les pilotes utilisaient souvent des verbes désignant l'acte de parole : ils expliquent qu'ils "disent", qu'ils "racontent", "rapportent" etc. Par exemple, au lieu de décrire simplement les actions lors du réglage d'un paramètre (comme la vitesse), ils déclarent : "Il dit «vitesse». L'autre va lui répondre : «je corrige» ou «je suis en correction». " Cela met en évidence la nécessité pour les pilotes d'amener leurs représentations dans un espace partagé et perceptible, en extériorisant leurs pensées d'une manière assez similaire à celle des strips des contrôleurs aériens. La parole a un rôle d'affichage.

Structures temporelles et rythmiques incarnées. C'est un aspect temporel marquant, l'activité du pilote est structurée par des rythmes. Il ne s'agit pas seulement de patterns de répétitions, comme dans de nombreuses activités collaboratives [RD02], mais aussi d'une ressource et d'une capacité incarnées, s'appuyant sur la parole ou le geste. Cela permet de soutenir diverses tâches, comme le balayage visuel pour vérifier des instruments à travers un chemin prédéterminé. La répétition de "on touche" dans la citation suivante, soulignée par des gestes corporels de toucher, dit quelque chose de ces rythmes incarnés : "on va toucher, on va faire comme ça ; on va toucher le panneau, ça, ça, c'est comme ça, comme ça, vous voyez on a une espèce de musique comme ça qui fait que l'on pourrait pas juste faire avec les yeux". Avec cette séquence rythmique, le pilote a souligné la nature incarnée de la tâche, expliquant que le balayage n'est pas seulement visuel, mais aussi tactile, le tactile étant plus musclé que l'utilisation des seuls yeux. Les actions séquencées sont parfois aussi comparées à de la musique, c'est-à-dire à quelque chose que l'on apprend par cœur, assurant une certaine automatisation physique pour obtenir un contrôle sûr et exhaustif.

C.2 Evaluation de Multiplié

Cette évaluation est largement détaillée dans l'article [PVL⁺19], nous en résumons ici les aspects principaux.

Saillance visuelle. Bien que le thème du projet soit centré sur des modalités largement haptiques et proprioceptives, c'est l'efficacité visuelle de la saillance des plis qui a été soulignée. Comme le disait un des pilotes : "On est interpellé en 3D", ou un autre : "Le 1er but de ce

système, je pense, est de pouvoir avoir une interface tactile ; là, vous avez ajouté le visuel *par-dessus*. ”

Principe de ”flat cockpit”. Les pilotes ont retrouvé un équivalent de ce qu’Airbus a popularisé comme le principe du ”dark cockpit” qui indique une situation nominale lorsque rien n’est allumé ; ici le principe est qu’il n’y a rien à faire, que la situation est nominale, lors que tout est à plat.

Structuration linéaire écologique. Certains des pilotes ont souligné la simplicité perceptive de la structure linéaire, où les unités d’information sont matérialisées par des écrans matériels (fig. 4.11.e).

Rythme. Les dispositifs transduisent par leur structure l’usage de rythmes consolidant les procédures orales.

Stabilisation de la main. La structure faisant émerger des plis permet de caler la main et de la stabiliser pour préparer une commande, par exemple, notamment en cas de turbulences(fig. 4.11.a,b).

Conscience mutuelle. La saillance et la position centrale permet de soutenir une meilleure conscience mutuelle.

Annexe D

Le geste matériel dans le cockpit

Cette annexe complète la section 5.1.

D.1 Dimensions des gestes des pilotes de ligne

Des gestes principalement collaboratifs. Pour assurer une gestion optimale des ressources de l'équipage, une répartition précise des tâches est définie avec des procédures opérationnelles standard basées à la fois sur une séparation stricte des tâches et sur une collaboration étroite entre les deux rôles de PF et PM [22]. La séparation stricte des tâches conduit à une répartition des zones d'entrée dans le système, en fonction du rôle du pilote et des différents systèmes avioniques conçus par les constructeurs. Ces zones sont appelées "zones de responsabilité" [25]. La disposition des commandes physiques sur les tableaux de bord oblige les pilotes à utiliser des gestes amples. En effet, l'architecture des cockpits et les séquences de tâches font souvent appel à des trajets gestuels importants, facilement perceptibles visuellement par l'autre pilote. Lorsque l'action est moins perceptible et que l'action est cruciale, le geste peut être accompagné de la parole, comme c'est le cas pour la commande de l'allumeur de moteur sur Airbus. Lorsque le pilote agit sur le levier, il tient la commande physique en la saisissant par le bas et place sa main de manière à maintenir visible l'identification du moteur sélectionné, et énonce simultanément l'action à venir.

Dimension intentionnelle des gestes. Le pilote agit sur le système avionique avec parcimonie et vise à réaliser une action dès qu'il pose sa main sur une commande physique. Le contexte critique impose aux pilotes de mesurer leurs actions et il n'est pas possible de modifier une valeur ou une fonction sans évaluer au préalable l'impact de ses actions sur la sécurité. L'intentionnalité est donc une notion essentielle du geste : pour la réalisation du travail collaboratif de l'équipage cette intention doit être partagée. Le geste, par sa visibilité, sa physicalité et son mouvement, est un support naturel pour informer l'équipage.

Flots de gestes. D'après les observations menées dans le cadre de la thèse, les gestes atomiques s'inscrivent toujours dans un flux procédural : il n'y a pas d'interaction isolée. Les pilotes exécutent des séquences gestuelles selon des protocoles ou des procédures définies par les compagnies aériennes et les constructeurs qui sont connues de tous les pilotes. Ces procédures régulières sont répétées à chaque vol et sont maîtrisées. En revanche, les procédures d'urgence ou de défaillance critique exigent des pilotes une plus grande attention et une moindre fluidité des mouvements.

Identification spatiale des commandes ciblées par les gestes. La disposition des commandes physiques et des informations dans le cockpit permet un accès visuel et gestuel partagé par les deux pilotes. Les pilotes étant assis, ils doivent effectuer des parcours gestuels de longueur variable pour atteindre les panneaux de contrôle, et ces parcours sont automatiquement perceptibles par l'ensemble de l'équipage. Comme les pilotes ont une connaissance incarnée de l'emplacement de chaque élément du poste de pilotage, ils sont capables de percevoir à tout moment quel objet est actionné par les gestes de l'autre pilote.

Dimension temporelle. Les dimensions temporelles d'un geste sont importantes pour assurer la conscience mutuelle dans les cockpits. Elles concernent d'abord la décomposition d'un geste unique en étapes successives : mouvement du corps vers la commande cible, préparation ou anticipation gestuelle, activation de la commande, et éventuellement vérification manuelle finale de l'action. Elles concernent également le cheminement et le rythme global du flux gestuel. La perception de ces successions, rythmes ou sommations de durées gestuelles, renseigne l'équipage du pilote sur sa

propre performance. En particulier, le pilote pourra modifier volontairement la fluidité du geste. Il pourra agir sur le rythme global du flux, ou caricaturer certaines parties du geste, par exemple en marquant des temps d'arrêt intentionnels lors de la préparation du geste pour fournir des informations à l'autre pilote.

Technicisation et automatisation du geste. Les procédures et les tâches sont fortement prescrites et l'ensemble d'actions (actions sur les commandes physiques, circuits visuels, communications orales) est à réaliser dans un ordre spécifique, en fonction des phases du vol ou des situations rencontrées. Un entraînement spécifique et une répétition constante du geste leur permettent d'atteindre un haut niveau de maîtrise et de technicisation. L'objectif est de faire en sorte que le corps et les compétences minimisent les ressources cognitives nécessaires à la réalisation de ces actions afin de les allouer à d'autres tâches [13][48].

Les gestes comme support d'information partagé. Lorsque le canal auditif est surchargé, le pilote utilise de manière informelle la fonction sémiotique des gestes pour communiquer dans le cockpit. Par exemple, il existe de nombreux signes gestuels "oui" et "non" ou la mimique d'une action qui permettent aux pilotes de coordonner ou de vérifier la préparation ou l'exécution d'une action en silence. Les gestes renseignent également l'équipage sur le comportement ou l'état du pilote, tout d'abord par l'action réalisée, mais aussi par la singularité des mouvements du pilote [28][3]. Par exemple, ils peuvent indiquer un état de fatigue, un état de stress ou de nervosité, ou encore un état de frustration. Si le pilote voit de la fatigue ou de l'anxiété chez son copilote, alors qu'il devrait être chargé d'effectuer l'atterrissage, il peut proposer d'inverser les rôles et d'effectuer l'action.

D.2 Designs proposés aux pilotes

D.3 Analyse des designs auprès des pilotes

Complétude. Dans plusieurs cas, c'est l'alignement de chaque élément qui signifiait la complétude, conformément au principe de continuité de la Gestalt, alors qu'un élément décalé signifie qu'il reste des actions à effectuer.

TABLE D.1 – Quelques-uns des designs de Gesture View

D1 : Honeycomb. Le geste en cours est représenté à gauche. A droite : le déroulement complet du flot : la taille des cercles et des rectangles vert augmente en fonction de la durée du contact et les hexagones perdent progressivement en saturation (la saturation permet une lecture ordonnée et sélective).	D3 : Bricks. Le flot est représenté par des rectangles dans les colonnes qui correspondent aux différents systèmes. Plus le geste est long, plus la saturation est faible. Selon la Gestalt, la perception pré-attentive permet au pilote de discerner le rythme de l'autre et ainsi d'identifier des informations telles que la fatigue ou le stress.
D4 : Onion. Le cercle vert s'agrandit au fur et à mesure du flot de gestes et remplit le cercle blanc et annonçant visuellement la complétude du flot (Gestalt). Le cercle vert se positionne tour à tour sur le segment correspondant au système impacté.	D5 : Finger Shadow. Le geste d'appui du doigt sur un bouton est représenté par le toucher de la pulpe du doigt avec sa forme et sa dynamique propre comme pour une action physique réelle, avec sa forme matérielle.
D7 : Blurring. Lorsque le PF sélectionne une fonction sur le FCU, les autres fonctions deviennent progressivement floues (sur la partie droite). Le flou est animé pour guider et focaliser le regard.	D8 : Rim Texture. La texture qui est représentée pour indiquer un geste s'inspire des boutons crantés du FCU.

Par exemple, un pilote a suggéré de changer les hexagones de D1 en carrés afin de pouvoir les aligner ensemble : "... de telle manière que graphiquement vous voyez que tout est aligné. Vous savez que tout a bien été fait". Un autre design ressemblant au camembert du Trivial Pursuit a été proposé pour représenter le remplissage dans D4. Enfin la couleur verte a été reconnue comme représentative d'une action terminée.

Perception des dimensions temporelles. Les pilotes ont fait plusieurs commentaires sur le temps, soit liés à la perception d'éléments temporels objectifs, comme la durée, le passé, soit, et de manière préférentielle, comme

une perception plus subjective, comme pour la vitesse, le retard, la régularité, le rythme, le contrôle, la hâte, la douceur ou la prudence. La régularité a été soulignée comme apportant des informations sur le fait que l'autre pilote se porte bien ou contrôle la situation : "Cela me dit : je sais où vous en êtes, que tout se passe bien dans le processus des checklists et c'est ce qui compte pour moi" (D3). La représentation des durées et des rythmes a été jugée utile pour ressentir la prudence face à des actions irréversibles, ou à l'inversion une hésitation anormale.

Conscience de la situation et conscience mutuelle. Toutes les représentations d'activité, comme celles comportant du temps, de l'intention, du rythme ou une trace, ont semblé pertinentes pour confirmer la présence de l'autre pilote. L'avantage de l'affichage centré vers l'avant a été apprécié comme évitant d'avoir à tourner la tête pour vérifier les actions d' l'autre.

Identification non spatiale des actions. L'un des inconvénients du tactile semblait a priori être la perte de repérage spatial des commandes physiques, puisqu'en effet, les écrans interactifs rendent obsolète l'apprentissage spatial des flux réalisés par des déplacements physiques. Il a semblé au contraire cela offrait un moyen plus simple d'obtenir le même résultat.

Matérialité. Les pilotes ont commenté les designs qui apportent des détails pour transmettre plus de "matérialité", par exemple en soulignant la rugosité d'un bouton (D8), la forme du doigt (D5), ou une nuance perceptive dans les couleurs (D1, D3, D4). Plusieurs pilotes ont apprécié le design Finger Shadow (D5) : " Oui, ça représente vraiment le doigt qui appuie, plus que les couleurs conventionnelles du truc qui serait comme ça, ça attire plus l' ?il je trouve ouais... sur un mouvement... ". La conception du flou a déclenché deux réactions opposées. Pour certains pilotes, le flou reflète efficacement un mécanisme de perception visuelle : " Ouais, le Blurring n'est pas mal... parce que comme tu dis, c'est vrai que ton ?il... plus c'est loin, plus c'est flou (...) on peut vraiment jouer sur les valeurs, donc à mon avis on ne peut pas mettre deux cents valeurs de flou, ça serait trop. Mais peut-être avec une dizaine... vous voyez... et ça fait dix valeurs. C'est quand même énorme, dix valeurs et vous... et c'est vraiment très naturel. Je pense que tout le monde le percevrait très bien. " expliquant également que : " finalement la couleur est vite agressive " (D7). Son collègue a souligné la progressivité : "

dès que tu finis celle-ci [la vitesse] et que tu passes à une autre, ça s'estompe progressivement, l'autre devient super claire, et donc tu as un changement super progressif ” (D7). Cependant, un autre pilote a rejeté le flou comme étant dangereux car il empêchait le libre accès à l'information. Comme le dit un pilote : ” En termes d'information, ce qui est intolérable c'est de ne pas pouvoir accéder à quelque chose. Vous comprenez ce que je veux dire, quand vous êtes dans un cockpit, vous ne pouvez peut-être pas tout afficher, mais vous devez pouvoir y accéder. Ce qui est vraiment ennuyeux, c'est quand vous ne pouvez pas y accéder. La conception de Rim Texture (D8) impliquait également la matérialité et la perception, mais elle s'est avérée non pertinente. L'imitation du granulé tactile des boutons crantés avec de minuscules formes graphiques, visant à différencier les boutons, était trop petite pour être remarquée. Enfin, les couleurs étant une information très codifiée des systèmes aéronautiques, il faut éviter de fournir des dégradés ou des nuances de couleurs : ” Je préférerais voir plutôt des ON OFF. Parce que maintenant vous voyez que ce n'est pas très clair le gradient d'opacité, il faudrait que ce soit plus marqué.” (D8).

Transparence et révélation graphique

La représentation dynamique de cette effectuation transformant à la fois système et situation collaborative fournit un exemple typique de relation humain-monde herméneutique au sens de Ihde [Ihd79] puisqu'elle est à lire comme un texte, bien que tout soit fait pour en favoriser l'incarnation (embodiment), et cette herméneutique se veut encoder une relation qui elle est bien incarnée dans un geste. Ce cas pose ainsi le problème de représenter la transparence : dans la relation incarnée humain-monde, l'humain traverse l'objet technique pour agir sur le monde, mais dans cette étude, la réflexivité souhaitée pour la compréhension par l'autre pilote, renforce l'opacité et amène à faire surgir la réalité technique sous-jacente, car la transparence est finalement un problème. Il y a bien individuation transductive dans le passage du geste au graphisme, avec passage d'un domaine dans un autre et choix de seuils pertinents. Cette étude, à l'instar de celles qui concernaient l'écriture, fournit un exemple d'une matérialité de l'interaction dans le sens d'une re-composition d'éléments en vue de l'émergence d'une forme, et ce d'autant plus que Valentin Becquet s'est attachée à questionner et représenter des éléments qualifiés dans son analyse de matériels.

Annexe E

Analyses de processus

Cette annexe complète la section 6.2.

E.1 Processus analysés

E.1.1 Paperoles et Musink

Eco-système. Le processus de conception et de recherche mené auprès des compositeurs de l'IRCAM s'est déroulé en plusieurs temps. Une première étape assez ancienne avait mon désir à la sortie du CNAM (en 1992) de travailler à l'IRCAM. J'y étais allée et j'avais rencontré des chercheurs, puis j'ai été recrutée à l'Institut Pasteur pour 15 ans. La deuxième étape s'est déroulée sur plusieurs mois en 2005-2006 : j'avais demandé un congé sabbatique de 2 ans à l'Institut Pasteur. Lors d'interviews de compositeurs de l'IRCAM menés avec Wendy Mackay, nous avons constaté l'importance de l'usage du papier pour les compositeurs. Suite à un exposé de l'approche de ma thèse sur la programmation pour les biologistes qui avait intéressé le responsable de l'équipe Représentations musicales de l'IRCAM, et à un exposé du concept de composition avec le stylo numérique par le biais d'une vidéo simulant des interactions, l'IRCAM et le LRI m'ont accueillie pour plusieurs mois en me fournissant un bureau. Durant cette période nous avons effectué une analyse ethnographique approfondie auprès des compositeurs [LMD07]. La troisième phase s'est déroulée de 2007 à fin 2008 autour de mon post-doc de 18 mois à l'INRIA. Le thème de recherche principal de ce post-doc était le projet Reactivity (voir section suivante E.1.2), mais une collabora-

tion très riche s'est également produite avec Théophanis Tsandilas qui avait commencé à développer un logiciel pour le stylo numérique pour les compositeurs : de nombreux interviews et ateliers ont pu être organisés avec ces derniers pour approfondir l'étude des besoins et expérimenter des fonctionnalités. Ce travail a été publié à CHI [TLM09] et a eu un prix du meilleur papier.

Analogie. Du point de vue créativité et invention, outre le fait bien sûr que le milieu de la composition contemporaine est un centre de recherche et d'innovation effervescent, surtout à l'IRCAM, le processus se caractérise par la conjonction d'un logiciel de composition opérationnel, de surcroît intégré aux logiciels de l'IRCAM, comme Open Music [AADR98] et l'occurrence de sauts d'invention se produisant durant les interviews avec les compositeurs. La tenue d'ateliers de conception collectifs nous avait été déconseillée, les compositeurs travaillant souvent en solitaire, mais le principe du brainstorming-prototypage a pu être mis en oeuvre à de nombreuses reprises.

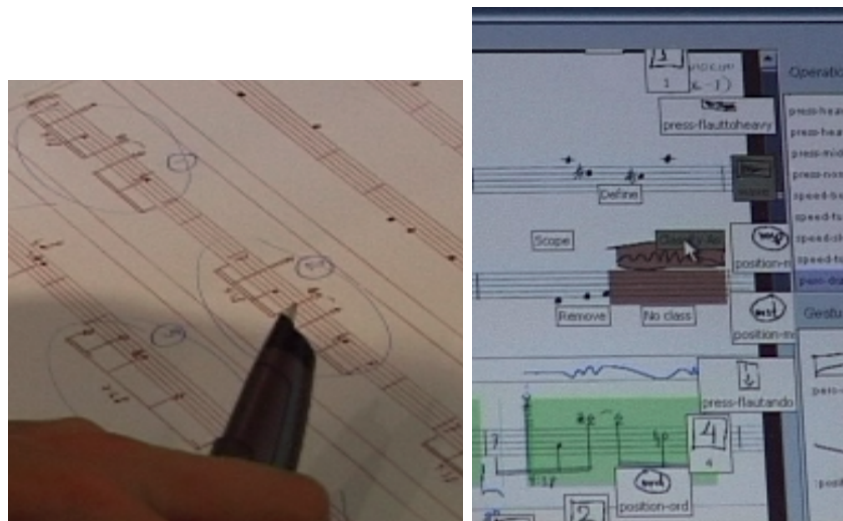


FIGURE E.1 – Open Music not Open Music : de la partition à la programmation.

A titre d'exemple, lors d'un interview-atelier avec un jeune compositeur américain, alors que ce dernier nous expliquait les notations, nous lui avons suggéré d'explorer les possibilités du "gesture browser" proposé par *Musink* pour écrire sa musique, qui comportait de nombreuses indications destinées à un instrument à cordes, avec des indications de pression sur l'archet assez inhabituelles et d'autres indications de percussion. Il avait suivi la formation sur Open Music, mais l'essai qu'il en avait fait lui avait semblé ne pas correspondre à son processus de composition. Pour aller plus loin dans l'expression de son processus d'écriture nous lui avons alors proposé de faire comme si *Musink* "était" Open Music. Dès l'instant où cette suggestion a été émise, sachant que cela consistait à imaginer des interactions inexistantes dans l'outil, une avalanche d'idées lui sont venues et ont pu être exprimées aussi parce que le système *Musink* fonctionne d'abord avec un stylo et du papier, et nous étions venus le voir avec plusieurs pages de ses propres partitions imprimées sur du papier Anoto. L'exploration lui a notamment permis de voir comment grâce à l'ordinateur, que ce soit avec *Musink* ou Open Music, il pourrait construire un nombre important de variations générées dans un intervalle de deux motifs graphiques, et aussi gérer l'arborescence de ces variations (fig. E.1). C'est donc un sorte de franchissement qui s'était produit, ce que Simondon appellerait un enjambement, passant de son environnement de partitions imprimées à de nouvelles propositions d'interactions dont les éléments de base ont pu être proposés dans une version ultérieure de *Musink*. Cette histoire n'est qu'un exemple des interactions que nous avons eu avec les compositeurs de l'IRCAM, mais cet exemple souligne l'effet individuant d'un recrutement d'éléments externes par analogie (ou transduction) pour non seulement résoudre un problème (celui de ce compositeur) mais même aller plus loin que ce qu'il imaginait. Le mouvement analogique qui avait été proposé en superposant les possibilités d'Open Music et de *Musink* et qui avait permis ce dépassement supposait également une compréhension mutuelle importante entre les concepteurs et le compositeur, nourrie de plusieurs mois d'étude et sans doute un peu aussi de la familiarité des chercheurs avec des indications musicales pour instruments à cordes frottées (avec une violoniste et une violoncelliste amateurs).

E.1.2 graphenda

Ce projet est décrit dans le chapitre 3, section 3.1.1. Il partait d'une problématique technologique, celle du stylo numérique, et du cadre d'un projet INRIA, Reactivity, sur la réflexivité dans les processus scientifiques.

Eco-système. J'avais participé à des projets faisant intervenir le stylo numérique pour des compositeurs (chapitre 3, section 3.2.1) dans le cadre du projet Paperoles puis du projet *Musink*. Je travaillais également depuis

plusieurs années avec des biologistes et bioinformaticiens comme ingénieure informatique à l’Institut Pasteur, et à ce titre, j’avais installé de longue date les pratiques de conception participative [Let99a] [LA04] [LM04] autour du thème des interfaces pour les biologistes [Let00b] [Let00a] [Let01a] [NMM⁺09] [CZMW⁺09]. L’éco-système de conception était donc très riche. Ce projet a donné lieu à deux types de processus de conception : l’un sur le long terme, avec une bioinformaticienne de l’INSERM qui s’était équipée du cahier numérique et du stylo, et qui utilisait un outil de blog similaire à un cahier de laboratoire que j’avais conçu (section 3.3.1), l’autre, déclenché par la démonstration de la version améliorée du stylo à biochimiste de l’Institut Pasteur dont la résultante a été une technique d’interaction. L’outil a obtenu un petit prix des démonstrations à la conférence francophone IHM en 2009¹, mais a surtout permis un développement théorique sur les liens entre programmation et écriture.

Matérialité. En revanche l’environnement technologique était compliqué par l’API du stylo Livescribe qui n’avait permis le chargement des données du stylo que tard dans le projet. Le seul moyen était donc de logger les événements de tracé sur le stylo et de parser le log envoyé sur l’ordinateur. Une version améliorée de l’API ayant été publiée à mi-projet, il a été possible de développer des interactions dans un outil de feuilles de données interactives (outil décrit dans la section section 3.1.1).

Idées. C’est cette ”rencontre” entre des besoins concrets d’un utilisateur et une technologie qui a permis le développement de l’outil de feuilles de données interactives. De manière analogue à l’échange avec le jeune compositeur américain décrit ci-dessus (E.1.1), le biochimiste a vu dans les possibilités du stylo Livescribe simplement démontrées sur le produit de base (un carnet et quelques démonstrations) un moyen de régler son problème du moment qui était d’effectuer des calculs sur une image, et si possible sur une image imprimée parce que cela lui permettait d’annoter informellement les résultats pour son cahier de laboratoire (voir section 3.1.1). L’idée a ensuite pu être proposée, indépendamment, à une autre biologiste sur une problématique complètement différente mais qui nécessitait également à la

1. Ce 2ème prix a à mon avis été gagné en partie sur les arguments théoriques que je proposais aux participants de la conférence qui venait voir la démonstration.

fois du calcul et de l'exploration, mais aussi de l'annotation et l'insertion dans un raisonnement à consigner dans un cahier de laboratoire.

Papier. La technique d'interaction s'appuyant sur stylo et feuilles de papier permettait une importante élaboration en ateliers de conception participative, comme pour Musink (3.2.2 et fig. 3.5).

E.1.3 Strip'TIC

Eco-système. Le projet Strip'TIC a commencé comme un projet personnel de deux collègues, l'un contrôleur aérien et l'autre jeune chercheur, inquiets de la disparition programmée des strips papier, et inspirés par un projet beaucoup plus ancien, Caméléon, à l'époque duquel la technologie du stylo numérique n'était pas encore prête [MFFM98]. Ma participation était due à mon implication récente dans des projets liés au stylo numérique (voir ci-dessus graphenda et Musink). Ce projet un peu pirate a démarré avec un projet étudiant [HEG⁺11] et a continué à recruter des enseignant-chercheurs et des étudiants sur toute sa durée. Le système est toujours en démonstration au laboratoire LII.

Matérialité. Le système est né de collaborations à plusieurs niveaux. C'est d'abord la mise en œuvre technique de la plate-forme finale par des chercheurs de l'ENAC, particulièrement délicate, reposant sur une organisation matérielle complexe de détecteurs infra-rouge, de projecteurs, et d'un tableau translucide pour poser les strips, bénéficiant d'une architecture logicielle solide [HLL⁺12a]. Ce projet illustre particulièrement bien le rôle de cet aspect de la matérialité dans un processus de "prise de forme" (section 2.7.2), contrainte par les propriétés techniques qu'il faut maîtriser pour que le concept "prenne forme", et l'énergie mise en œuvre, que ce soit en compétences de haut niveau, échange collaboratif, résistance ou complaisance des composants électroniques, etc (figure E.2).

End-user programming. C'est ensuite grâce à cet environnement connecté offrant un potentiel de conception particulièrement intéressant du fait d'une nouvelle technologie qui s'alignait directement aux besoins de l'activité (e.g section B.1B.2), et que les nombreuses activités IHM auxquelles j'ai participé ont pu se développer. Une de ses particularités de Strip'TIC

The main challenge was to use pen pattern on the radar screen and on the stripboard. Pen pattern detection is made with infrared light: a small infrared light inside the pen illuminates the paper while the camera films the paper (Figure 7). In order to use pen pattern on translucent material (the radar screen and the stripboard), we performed many trials. One attempt was to print pen pattern on tracing paper. This paper is translucent and reflects infrared. Unfortunately, sticking tracing paper on the radar screen and on stripboard is difficult: tracing paper does not create homogeneous areas (some are brighter, and some are darker), which hinders the quality of display. Therefore we used the Kimoto 100 SXE [12] plastic sheet that also reflects infrared. As opposed to Digisketch [22], we managed to print pen pattern directly on this plastic layer with a standard laser printer. The resulting visualization is brighter and more homogenous compared to tracing paper.



Figure 11: light spectrums

To address this, we spread the range of spectrum of the lighting used by each technology along the whole spectrum (Figure 11). Since AR pattern is not to be seen by users, we could shift the spectrum to infrared. We thus used an infrared light source and a modified webcam. Infrared light source is provided by 30 infrared LEDs positioned under the strip board (Figure 6). Standard webcams are rendered infrared blind by their manufacturer with a filtering lens. We removed the infrared filter in front of the lens and replaced it with an infrared sensitive filter. The modified webcam only detects infrared light from the LEDs. The infrared spectrum of the AR processing is different from the infrared spectrum used by the digital pen, thus they do not compete with each other.

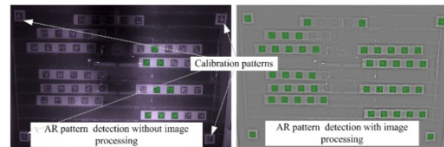


Figure 12: Strip tracking without (left) and with (right) image processing. Green squares represent detected AR pattern.

FIGURE E.2 – Conditions matérielles de "prise de forme" dans Strip'TIC

est également d'être soutenu par un contrôleur aérien qu'on peut considérer comme un "end-user programmer" [Lie00] [HPVW05], qui programme les graphismes des projections ainsi que les différentes fonctionnalités, et co-cadre les projets associés au système (interactions multi-touch [SHL⁺13], interactions mid-air [GMD⁺14]). Bénéficiant de l'éco-système très riche de l'ENAC, et de sa culture de conception participative, le système s'est ainsi progressivement enrichi et affiné au fur et à mesure des ateliers de prototypage collaboratifs dont les idées étaient souvent et rapidement mises en oeuvre par la suite par les programmeurs du système.

E.1.4 Ecritures mêlées pour les techniciens de maintenance

Eco-système. Du point de vue de l'invention, ce projet étudiant, dont l'objectif était d'explorer l'utilisation du stylo numérique pour la maintenance aéronautique, fournit un exemple de proposition d'une idée de technique d'interaction par un des techniciens de maintenance lors d'un atelier participatif.

Idées. Le phénomène est similaire à celui qui s'était produit à l'Institut Pasteur (voir section ci-dessus E.1.2) : en comprenant le fonctionnement du

stylo numérique, avec notamment la datation des tracés, le technicien y a vu une solution potentielle pour un problème de ratures sur le formulaire réglementaire à remplir lors d'essais en vol. Son idée a constitué le coeur de l'étude des étudiants, qui ont rédigé un scénario et créé une vidéo illustrant l'application de l'idée : utiliser une timeline pour filtrer les tracés selon leur date, permettant ainsi d'éliminer un tracé précédent comme si on avait une gomme (fig. E.3).

Vérification absence fuite d'huile		On				OK	
Relevé des compressions (au point fixe d'entrée) Valeurs à reporter sur le livret moteur		1	2	3	4		
		75 /80	75 /80	78 /80	78 /80	/	/
OBSERVATIONS : RHS							
Terrain : LFDR							
Nom du technicien		Date et Heure					
BWD		15 ^h 00 27/03/12					
Nom du technicien		Date et Heure		Signature			
BWD		15 ^h 00 27/03/12		[Signature]			
Heure : ----- ----- ----- -----							
15h00		15h30		16h05		16h45	

FIGURE E.3 – Exemple de rature (champs "Terrain"); la timeline (en bas) permet de démêler les écritures selon la date des traits

Papier. Ce secteur est en train de passer au numérique et aux formulaires mais à la date du projet, le papier était utilisé pour tracer l'activité, malgré le coût pratique associé.

E.1.5 Medusa

Eco-système. Le projet Medusa présente une particularité dans la mesure où il y a un processus "cas d'étude" (qu'on appellera Medusa-cas) pour un processus "recherche" (qu'on appellera Medusa-méthode) dont l'objectif est méthodologique (MEDUSA étant l'acronyme pour : MÉthode de conception

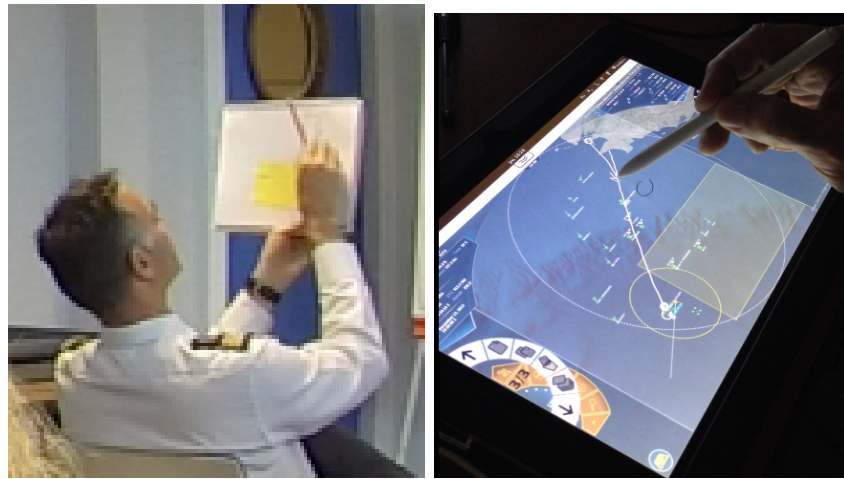


FIGURE E.4 – a) atelier participatif avec l'équipage de la 24F : scénario "Décider collaborativement d'une stratégie de sauvetage" et prototypage de la tablette par le commandant, avec un bloc de papier qu'il soulève pour signifier qu'il s'agit d'un partage visuel avec l'équipage, b) test de la tablette implémentée en djnn/smala : "Sergio ... Tu vois le schéma là? C'est fantastique ... C'est ici que les bactéries attaquent!"

de systèmes Dirigée par les modèles et orientée par les USAges). Il s'agissait de proposer et d'évaluer une démarche système originale orientée par les usages et fondée sur les modèles, afin que les systèmes complexes de sécurité maritime puissent être adaptés facilement à l'opérateur et au contexte d'utilisation. L'aspect "fondé sur les modèles" faisait référence à l'utilisation du framework Istar (maintenant djnn/smala [MCC⁺18]) développé par l'équipe LII de l'ENAC. Ce qui caractérisait ce projet et lui donnait un fort potentiel était de reposer sur un cas d'étude concret, la surveillance maritime aéroportée, avec la possibilité de travailler directement avec un équipage. Même si la disponibilité de l'équipage n'est arrivée que tardivement (à 6 mois de la fin du projet environ), cette collaboration a permis d'expérimenter concrètement un petit nombre d'innovations méthodologiques [LPV⁺14].

Idées. Du point de vue tout d'abord du processus de conception de "Medusa-cas", le principal fait à relever est l'émergence rapide grâce au processus participatif non d'une réelle invention mais d'une solution satisfaisante pour les opérateurs et pour l'entreprise partenaire (Thalès) sous la forme d'un outil sur tablette tactile pour la décision collaborative d'un parcours de sauvetage. Le concept de tablette partagée pour la prise de décision était dérivé d'une métaphore issue de l'analyse de l'activité, où ressortait très fortement l'idée d'un "bus audio" dans l'avion, vecteur des communications denses dans un environnement qui s'était révélé intensément collaboratif lors de l'analyse de l'activité. Les outils participatifs mis en œuvre sont classiques, mais insuffisamment utilisés dans l'industrie : entretiens contextuels non pas de chaque opérateur mais de tout l'équipage (pilote, commandant, 2 photographes, radariste) à qui a été demandé de rejouer une mission spécifique, prototypage papier ultra-schématique mais efficace avec un bloc note papier en guise de tablette graphique, ce qui suffisait aux opérateurs pour esquisser l'interface et les données pertinentes et montrer les interactions, en les situant dans le problème concret en cours, puis conception et programmation de l'IHM, testée par l'équipage lors d'une expérimentation quelques mois plus tard.

Images. Du point de vue du processus recherche "Medusa-méthode" (conception d'outils et de méthodes pour le concepteur), la réalisation concrète d'un vrai cas d'étude a permis d'organiser des ateliers de conception très efficaces. L'un de ces ateliers, notamment, a permis d'expérimenter un croisement de culture entre méthodes de l'IHM et méthodes formelles de

l'ingénierie. Il a été possible, en particulier, 1) de confronter la modélisation formelle (modèles de tâches en format effbd) avec des scénarios textuels riches, et 2) d'évaluer l'utilisation de ces modèles formels comme "design rationales" pour des décisions de conception d'IHM (voir plus en détail section 6.1.1). Ce que ce processus illustre tout particulièrement à mon sens, c'est que la conception d'outils pour l'ingénieur, et l'invention dans ce domaine, requière des données concrètes et des expérimentations. Cela n'est pas facile car la donnée "processus" est lourde à manipuler, et c'est sans doute la raison pour laquelle le processus "Medusa-méthode" a essentiellement, à mon sens, consisté en une reformulation du problème posé par le projet officiel. Ce dernier portait sur la conception basée modèle, et s'est conclu par un score 1-0 en faveur de la conception participative. C'est également un domaine où le stade image-symbole dont parle Simondon, stade précédant l'invention où le saut d'ordre de grandeur est coûteux car il est collectif : or, il est malaisé d'avoir des image-symboles collectives explicites. C'est une des raisons pour lesquelles ces expérimentations nécessitent parfois de *ralentir* un peu sur certaines étapes du processus, ce qui est inhabituel et coûteux : étapes d'explicitation, de réflexivité, d'écriture, si possible en ateliers collectifs. Ce projet a peut-être permis une expérimentation de ces image-symboles, et c'est le pari qui est fait dans une thèse qui va commencer à l'automne 2021 sur un sujet similaire (section 7.3.4).

Papier. Le papier, au sens matériel du terme, a joué un rôle banal mais important dans le processus, surtout pour la partie "cas d'étude", puisqu'un bloc-notes papier a servi d'objet analogue lors de l'atelier avec la 24F pour expérimenter l'idée d'une tablette graphique. Le format du bloc convenait bien, et il a été utilisé par le commandant pour dessiner l'interface et la stratégie (le pattern géographique). Mais ce rôle,

E.1.6 STAMP

Eco-système. Il s'agissait dans ce projet de concevoir une visualisation de cellules orageuses sur le ND (Navigation Display) des pilotes de ligne. S'il est utile de mentionner ce projet dans ce chapitre c'est d'abord pour l'aspect mono-participatif, toute l'étude ayant été menée avec un seul pilote, un pilote d'Air France habitué aux vols long courrier dans la zone de convergence inter-tropicale (ITCZ). La conception collaborative de l'IHM a recruté des savoir-faire de l'équipe en terme de techniques de visualisation 2D et 3D, de

design graphique (couleurs pour le cockpit), et de dispositifs d'entrée (bouton rotatif pressable).

Idées. Il y a eu une forme de prototypage participatif durant les entretiens avec le pilote - ces derniers illustrant bien l'intérêt de la dimension contextuelle - décrire un vrai vol - pour comprendre comment un pilote fait *vraiment* pour gérer d'immenses orages dans la zone du Pot-au-noir entre la pointe du Brésil jusqu'à la côte africaine, en dehors des outils prescrits comme le radar qui a d'importantes limitations (dont principalement l'occlusion). Le pilote a pu grâce au dispositif contextuel de l'interview donner deux informations déterminantes sur la pragmatique (work-as-done) de cette tâche, en s'appuyant sur des données concrètes. La première est l'indication d'un logiciel trop peu précis pour être utilisable mais affichant verticalement les cumulonimbus (fig E.5.b) (voir l'extrait d'interview en annexe G G.1), les données concrètes étant les schémas de cellules orageuses du lieu de l'accident du vol Rio-Paris, ainsi que les visualisations de hauteur de cumulonimbus fournies par un algorithme de météo France (fig E.5.a). Il a proposé l'idée d'une sorte de visualisation 3D, ou juxtaposant de l'horizontal et du vertical - idée conservée jusqu'à la fin du projet [LZVC15]. La deuxième information déterminante est l'utilisation de la radio entre pilotes, en écoutant notamment celui qui est devant, comme *seul* réel moyen de savoir quelle décision prendre.

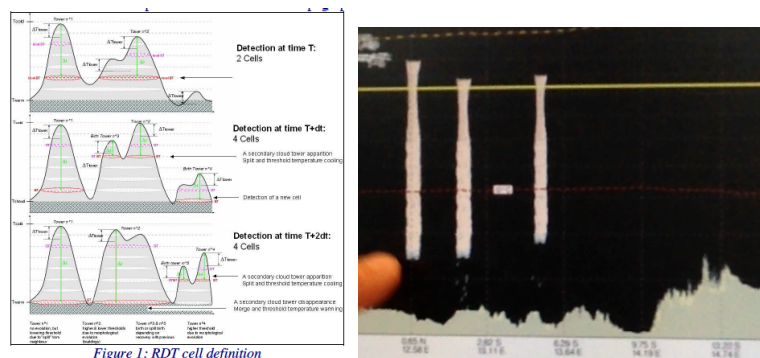


FIGURE E.5 – a) Visualisation fournie par Météo France sur la hauteur des cellules orageuses d'après des données satellites. b) Logiciel "idéal" suggéré par le pilote pour la visualisation des cumulonimbus.

E.1.7 Airtius

Eco-système. Les questions de recherche relatives aux interfaces tangibles explorées dans le projet Airtius sont présentées dans le chapitre 4 section 4.3. Ce que nous abordons ici est seulement un descriptif et une analyse du processus lui-même, dont le déroulement a suivi toutes les règles de l'art du domaine grâce à un bon financement sur 3 ans (ANR), des partenaires de haute qualité dans un consortium complémentaire et très soudé, et une gestion de projet exemplaire par Jean-Luc Vinot, designer de longue date dans l'aviation civile et enseignant-chercheur au LII, dont je salue ici la mémoire.

Le projet a pu inclure jusqu'à 5 designers professionnels, 3 experts facteurs humains en aéronautique et 4 développeurs, et pouvait s'appuyer sur un savoir-faire collectif venant de plusieurs années de collaboration sur d'autres projets. Le projet incluait la thèse de Sylvain Pauchet [Pau19], dont j'étais co-directeur avec Jean-Luc Vinot et Stéphane Conversy. Le projet était très structuré. Toutes les phases du projet ont fait l'objet de publications : l'état de l'art [VLPC16], l'analyse de l'activité [LVP⁺18], certains stages d'étudiant [LVPL19], les deux prototypes finaux [PLV⁺18][PVL⁺19] et l'évaluation [CVL⁺21]. Un article est en cours de rédaction sur la conceptualisation (voir chapitre 4 section 7.1).

Idées. Du point de vue de l'invention il y a selon moi quelques aspects marquants. Le projet était au départ très ouvert, notamment sur la forme des prototypes et les paradigmes d'interaction, comme en témoigne un état de l'art assez vaste qui va du geste aux matériaux intelligents en passant par les objets tangibles, les surfaces transformables et l'haptique [VLPC16]. La direction était : une approche mixte des interfaces, intégrant au tactile des objets physiques et des interactions dans l'espace physique, pour mieux prendre en compte les capacités sensori-motrices des pilotes, permettre une meilleure collaboration, identifier et traiter les problèmes potentiels posés par le tout tactile. Le projet a donné lieu à de nombreux ateliers impliquant les designers du consortium, entre 2 et 5 d'entre eux à chaque fois. L'approche adoptée était naturellement une approche de designer, comportant une phase importante d'imprégnation et de compréhension, et des explorations en parallèle, avec des phases d'expansion de l'espace de conception, et des phases de réduction. Concernant la dimension participative, il y a eu de nombreux interviews et ateliers avec des pilotes (45h d'interviews et ateliers, 550 pages de transcription, 7 ateliers).

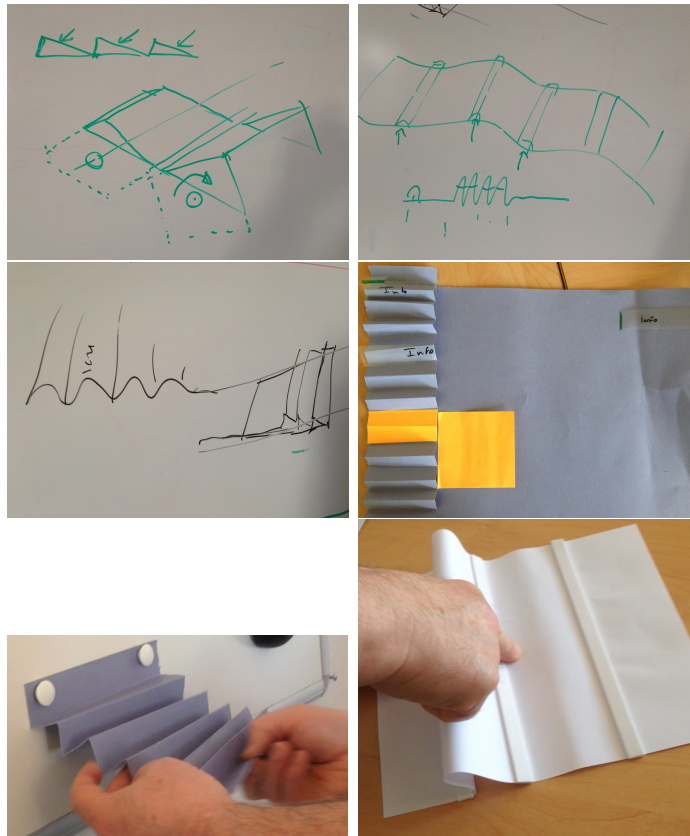


FIGURE E.6 – Emergence du concept : a) prismes, b.c) schémas, d.e.f) explorations papier.

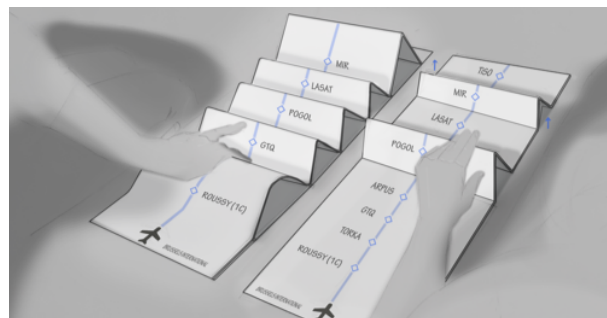


FIGURE E.7 – Concept de Multiplié.

Le projet était cependant plutôt une étude de type design que de type fonctionnel : bien qu'il y ait eu de très nombreux entretiens contextuels, leur but était plus de comprendre les dimensions physiques de l'activité (cf section 4.3.1) que de comprendre les besoins des utilisateurs et concevoir des fonctions sur cette base. Les ateliers de design collaboratif étaient d'ailleurs majoritairement sans pilotes (sauf deux exceptions). Ce qui est produit dans ce type de projet est ainsi plutôt un "objet", réalisation d'un concept, qui, de par ses propriétés, ses affordances, reste potentiellement ouvert à de multiples possibilités fonctionnelles, à définir - et ce, même si certains fonctions, certains scénarios, ont bien été implémentées (cf. les cinq scénarios, section 4.3.2, fig. 4.9). Le projet a cependant donné lieu à une exploration méthodologique pour faire converger design et ingénierie système (cf section 6.1.2).

Le résultat le plus frappant du projet réside dans les trois dispositifs construits et mis en œuvre au cours du projet : GazeForm (fig. 4.8) [PLV⁺18], Multiplié-I (fig. 4.9.a) et Multiplié-II (fig. 4.9.b) [PVL⁺19]. Le concept de GazeForm, qui est d'utiliser le regard pour déclencher une transformation de la surface, s'est présenté de manière assez directe par transfert analogique simple en discutant avec un collègue d'un autre laboratoire qui avait utilisé ce principe pour zoomer ou dé-zoomer une zone de l'écran. Je me propose en revanche d'analyser plus particulièrement l'émergence du concept de Multiplié.

Ce qui est devenu une des idées clef du projet et qui consistait dans le concept de surface pliée comme un accordéon est née lors d'un atelier de design, c'est-à-dire sans pilotes cette fois-là. L'idée s'est proposée collectivement : elle partait de la proposition d'un des designers d'étudier l'idée de prisme pour créer des surfaces (fig. E.6.a), et - sans doute en passant par des dessins au tableau (fig. E.6.b.c) - l'idée visuelle - l'image - de l'accordéon s'est-elle imposée comme une évidence (figure E.6.a,b,c). Toujours est-il que le reste de l'atelier a consisté à travailler sur des accordéons en papier (figure E.6.c,d,e). Ce qui est peut-être à noter c'est qu'il y a eu un passage entre une réflexion sur la matérialité d'une surface avec l'idée de la recomposer en combinant des prismes, pour aboutir à quelque chose d'assez conceptuel, le principe de plier une surface sans préjuger de la possibilité matérielle de la faire. On peut remarquer que ce concept ne peut être figuré qu'avec une vraie feuille de papier ou par un dessin (fig. E.7). Les deux prototypes en déclinent deux instances concrètes et fonctionnelles très différentes, ni l'autre ni l'autre l'exacte matérialisation du concept : Multiplié-I ne réalise le concept que partiellement puisqu'il contient des vides entre les plis, et Multiplié-II,

bien que plus proche, n'a pas la granularité flexible d'une feuille de papier. L'émergence de ce concept est bien sûr difficile à analyser. Les hypothèses qu'on peut avancer sont son adéquation avec l'objectif de donner de la forme aux surfaces, et probablement son alignement avec la compréhension de l'activité qui comportait des "insights" sur le besoin de structurer les tâches et les données dans des dimensions saisissables et compressées. Outre une adéquation aux données de type "liste" telles que les checklists ou les plans de vol, on retrouve dans le pliage unidimensionnel l'idée de linéarité de la parole, espace privilégié de partage de décision des pilotes (fig. E.11.g), avec des notions de parcours séquentiel et de cadence, ou de "rythme" - la "musique" qu'évoque eux-mêmes les pilotes [LVP⁺18] (fig. E.11.e). Nous étions donc "imprégné.e.s" de cette compréhension de l'activité par une longue activité d'interviews, de transcriptions, de classement des idées, et de rédaction d'articles scientifiques. L'expérience très positive de GazeForm avait montré la nécessité d'une structuration plus globale de la surface, permettant de moduler des points de déformation de manière plus homogène et plus continue que des boutons interrompant la surface.

Concrétisation Dans le projet Airtius, divers projets intermédiaires, souvent des projets étudiants, ont permis de concrétiser progressivement les dispositifs pour le cockpit en utilisant un environnement de prototypage constitué d'un cockpit en bois (fig. E.8). Ces stages étudiants ont porté par exemple sur le concept de réglage de fréquence radio dans la paume de la main (fig. E.9.a), sur l'élaboration d'un bouton rotatif tangible (fig. E.9.d), de dispositifs de pliage et de tactilisation de surfaces (fig. E.10.i,j,k), sur la conception d'une timeline centrale pour les pilotes (fig. E.9.c), d'un overhead panel (fig. E.9.e), d'une application de data-link graphique (fig. E.9.b) ou de FCU tactile (fig. 6.2.c).

Matérialité. En revanche, autant le concept est arrivé rapidement durant un atelier, autant le passage du concept à la réalisation a pris son temps, illustrant à nouveau les énergies opérantes dans une prise de forme faisant intervenir deux domaines de réalité, l'une de l'ordre du concept et d'un désir esthétique de cohérence et de continuité, l'autre d'un ordre matériel mettant en jeu des composants plastiques, électroniques, logiciels, graphiques (section 2.7.2). D'autres concepts ont certes eu la priorité entre-temps comme celui de GazeForm - mais ce délai s'explique aussi par - à mon avis - deux autres rai-



FIGURE E.8 – Plate-forme de prototypage : cockpit en bois, simulateur, Multiplié I.

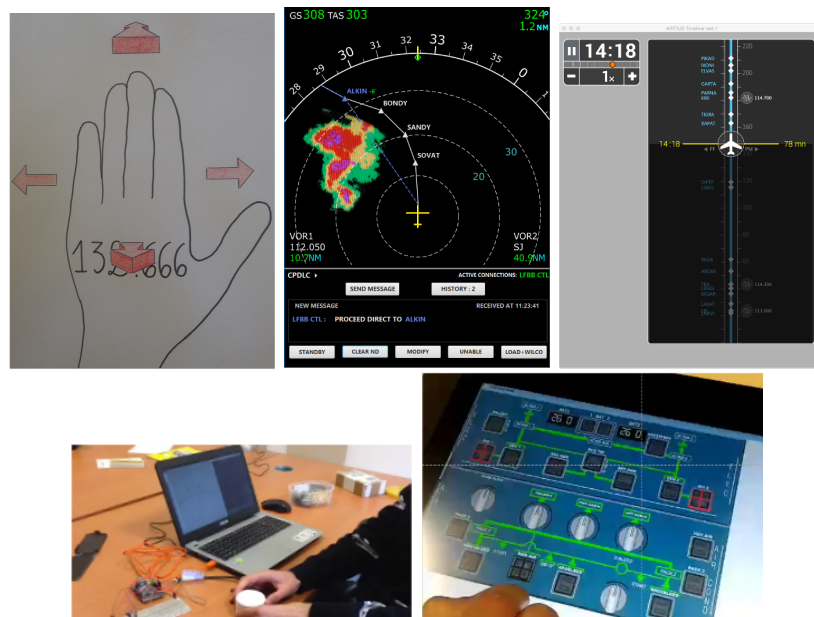


FIGURE E.9 – Prototypage des éléments du cockpit tangible : a) bouton dans la main, b) data-link graphique, c) timeline centrale, d) bouton rotatif, e) overhead panel.

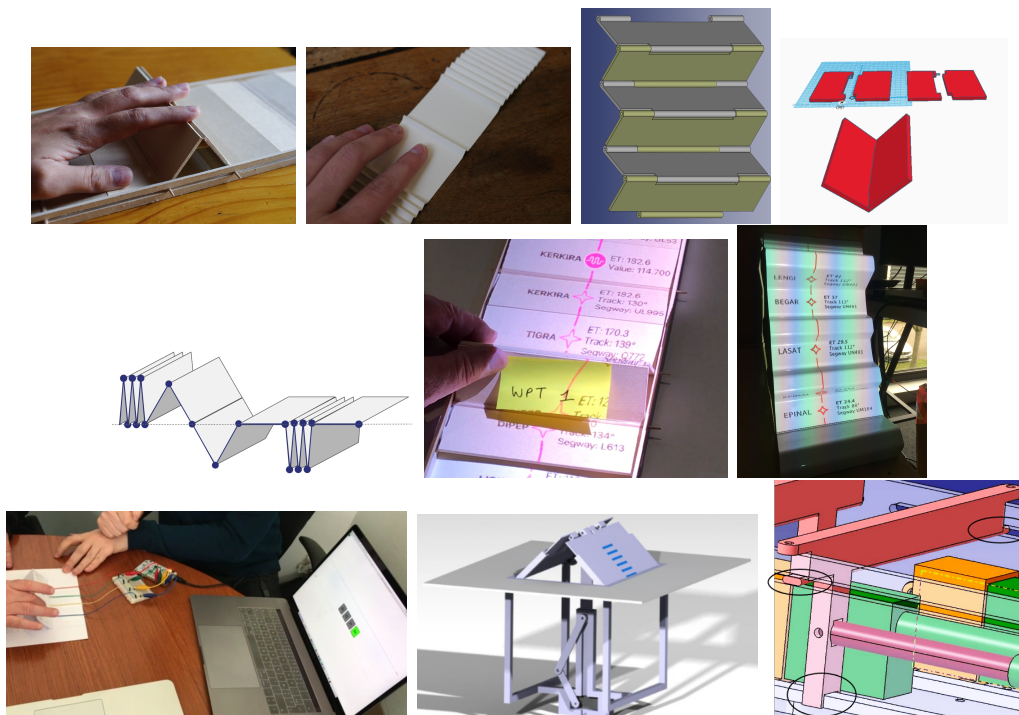


FIGURE E.10 – Matérialité : exploration systématique des matérialisations du concept : a.b) maquettes carton, c,d) modélisation 3D des charnières, e) principe général de la structure, f) vidéo papier+mapping, g) autre support, h) essais encre tactile, i,j) modèles mécatroniques avant réalisation.

sons. D'une part, une réelle hésitation : l'esthétique et la simplicité du concept nous avaient séduits sur le plan du design, mais ce concept représentait une distance importante par rapport à l'activité et à son environnement technique. Le concept relevait d'un certain pari, et n'a été discuté avec les pilotes que lors des ateliers où ils sont venus l'expérimenter avec les vrais prototypes finalisés, ateliers au cours desquels le concept a été très apprécié par les 6 pilotes participants. D'autre part, une difficulté de conception technique, et ce, peut-être plus que de réalisation. Comment mécaniser un concept dont la réalisation la plus naturelle est une feuille de papier pliée ? Comment reproduire avec des écrans, des vérins, des moteurs, des câbles la simplicité, la finesse, la souplesse d'une feuille de papier. De nombreuses options ont dû être explorées de manière intensive sur une durée de 4 mois, durant lesquels de très nombreux artefacts, de types divers, ont été explorés : maquettes cartons, dessins 3D, études graphiques, scénarios, essais techniques pour la projection avec mapping, pour la tactilisation, études mécatroniques, etc (fig. E.10). Si l'émergence du concept opérait un passage conceptuel très rapide de la matérialité des surfaces (prismes), la mise en forme effective - comme dans tout projet de ce type - illustre très bien la problématique de composition décrite par Wiberg [Wib17], composition qui selon lui décrit la matérialité numérique, tout à fait dans la ligne de ce qui dans la technè grecque est la part matérielle - hylè - qui réfère à *ce dont est fait* l'objet.

Images. Il faut donc noter l'importance des artefacts de conception dans le projet, notamment tout ce qui est papier, carton, pâte à modeler, mais aussi et qui a été d'une grande influence, tout ce qui est dessin, réalisés par un designer du projet. Il s'agit de dessins (fig. E.11) tels que les designers savent les faire, c'est même selon Buxton ce qui définit un designer [Bux07b]. Ces images étaient visibles en permanence sur les murs des bureaux de l'équipe. Ce qui résume enfin le mieux le concept de Multiplié est un dessin, celui de la figure E.7.

Ce qui est à comprendre du processus de mise en forme que décrit toute technè (technique ou artistique puisqu'en grec le mot inclut les deux) c'est qu'il faut que cette matière offre des possibilités de mise en forme - tel les nervures du bois pour fabriquer un objet en bois. L'équivalent numérique, graphique et électronique de ces possibilités n'était pas donné d'avance dans Multiplié : de nombreuses activités (fig. E.10) - activités qui font partie des méthodes classiques mises en œuvre en design [Bux07a] - doivent être en-

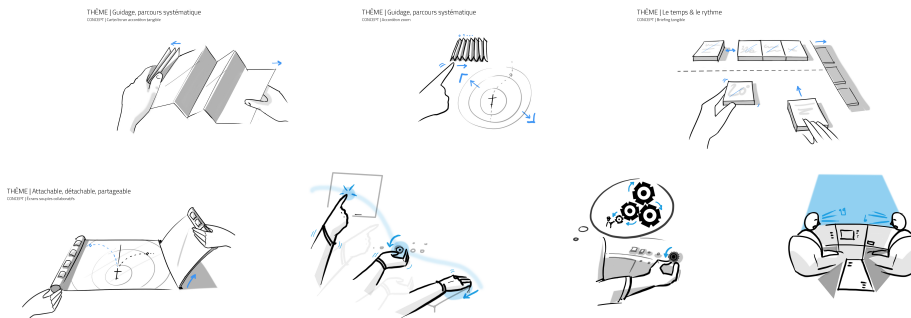


FIGURE E.11 – Le rôle des images : dessins de designer pour le projet (©Intactile Design) : a) carte accordéon, b) zoom avec des crans, c) briefing tangible, d) écran souple détachable, e) structures rythmiques, f) conscience dans le contrôle, g) communication verbale comme espace de partage privilégié.

treprises pour qu'à un moment donné puissent "s'aligner les planètes". Pour utiliser les concepts de Simondon, ces activités avec les individuations qu'elles induisent rendent possible qu'à un moment donné, et ce de manière très collaborative, des transductions et des analogies se produisent. Car le processus de design n'est pas de la logique déductive, comme on le sait. Il comprend plutôt des phénomènes de résonance, de contraste, de transfert : ce sont des images externes qui sont produites et recrutées pour faire avancer collectivement le concept, mieux le comprendre, parvenir à le concrétiser. Par images nous entendons tout autant les dessins mentionnés ci-dessus (fig. E.11), que le concept (fig. E.7), et les artefacts produits, certains dynamiques comme les vidéos ou les dispositifs, d'autres plus visuels (fig. E.10). Ce sont pour cela aussi des images internes de ce concept qui opèrent auprès de chaque participant, avec leurs versions externes sous forme de réalisations techniques individuelles (un graphisme, une vidéo d'un scénario, un dispositif électronique, un schéma mécatronique, etc). Les contrastes, les idées opposées pour un même point, ce qu'on appelle des tensions en design, fournissent cette métastabilité dont parle Simondon, avec son énergie potentielle présente et activée pour franchir chaque seuil inventif. Ce processus comporte également une activité permanente de communication et d'échange au sein de l'équipe et du consortium, chaque partenaire étant bien au fait de processus de design collaboratifs expérimentés auparavant. Si on peut parler de transductions, c'est donc

pour rendre compte de ces phénomènes analogiques, de transfert d'images partielles et non définitives des éléments de l'espace de solution, les tensions servant, pour ce qui ne ressort pas de transformations évidentes, à pousser les individuations pour un environnement mieux "aligné".

Pour autant, il faut bien souligner que le développement qui a eu lieu avec Multiplié, même si les activités passent systématiquement par de l'extériorisation physique, de la mise en situation, est un chemin de l'abstrait vers le concret. C'est un chemin depuis un *problème* général (les limites du tactile), en passant par des prototypes intermédiaires qui ont en quelque sorte laissé le passage à un *concept*, dont l'équipe a instantanément cherché à expliciter des formes (papier plié) et des situations (checklist), vers *deux prototypes concrets* et numériques Multiplié-I et Multiplié-II dont la dualité est la preuve que la concrétisation n'est pas terminée. On pourrait s'amuser à rappeler que le "non-un" est chez Simondon le préindividuel, ce qui indiquerait qu'une autre individuation est à venir. Le processus d'Airtius illustre bien le design comme mouvement de l'abstrait au concret mais pour parvenir à un *concept enrichi* (fig. E.7), et donc à une abstraction affinée qui demande une nouvelle concrétisation (plus industrielle par exemple).

Papier. Enfin, tout comme les projets graphenda, Musink, Strip'TIC, feuilles de maintenance et Medusa, on peut noter le rôle important de la métaphore papier dans l'idée ou dans le processus. Le concept d'une surface pliante, comme on le voit dans la figure E.7, est un concept pour le papier, facile et habituel en papier, simple comme bonjour comme le papier.

E.2 Caractéristiques des processus analysés

	<i>graphenda</i>	<i>Musink</i>	<i>Strip'TIC</i>	<i>maintenance</i>	<i>STAMP</i>	<i>Medusa</i>	<i>Airtius</i>
Origine(s) de la problématique							
recherche	✓	✓	✓			✓	✓
besoins opérationnels	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
projet étudiant				✓			
cas d'étude					✓	✓	
technologie	✓	✓					
Eco-système du projet							
projet financé	✓				✓	✓	✓
projet émergent		✓	✓			✓	
utilisateurs collègues	✓		✓				
projet(s) précédent(s)	✓		✓				
domaine commun	✓		✓	✓	✓	✓	✓
co-localisation	✓	✓	✓				
Méthodologies							
entretiens contextuels	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
prototypage participatif	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
conception par scénarios	✓	✓	✓	✓		✓	✓
ateliers collectifs	✓		✓	✓		✓	✓
designer(s) dans le projet			✓		✓		✓
sonde technologique	✓			✓			
approche fonctionnelle		✓	✓		✓	✓	
exploration méthodologique						✓	✓
progr. par l'utilisateur			✓				
Origines des idées (hypothétiques ou factuelles)							
observation			✓				
designers		✓	✓		✓		✓
atelier participatif	✓		✓	✓		✓	
utilisateur	✓			✓	✓		
transfert d'un autre domaine					✓		✓
images		✓		✓		✓	✓
analogie		✓					✓
technologie papier	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Résultats							
concept(s) d'interaction	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
technique(s) d'interaction	✓	✓	✓		✓	✓	✓
dispositif(s)			✓				✓
concept(s) générique(s)	✓	✓	✓			✓	✓
publication(s)	✓	✓	✓		✓	✓	✓
démonstration		✓	✓			✓	✓
Liens avec l'enseignement							
sujets de projets étudiants			✓	✓	✓		✓
lien avec thèse(s)		✓				✓	✓

Annexe F

Approches systémiques

Cette annexe complète la section 7.3.4.

Approche analytique	Approche systémique
<p><i>Isole</i> : se concentre sur les éléments.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Considère la nature des interactions. - S'appuie sur la précision des détails. - Modifie une variable à la fois. - Indépendante de la durée : les phénomènes considérés sont réversibles. - La validation des faits se réalise par la preuve expérimentale dans le cadre d'une théorie. - Modèles précis et détaillés, mais difficilement utilisables dans l'action. - Approche efficace lorsque les interactions sont linéaires et faibles. - Conduit à un enseignement par discipline. - Conduit à une action programmée dans son détail. - Connaissance des détails, buts mal définis. 	<p><i>Relie</i> : se concentre sur les interactions entre les éléments.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Considère les effets des interactions. - S'appuie sur la perception globale. - Modifie les groupes de variables simultanément. - Intègre la durée et l'irréversibilité. - La validation des faits se réalise par comparaison du modèle avec la réalité. - Modèles insuffisamment rigoureux pour servir de base aux connaissances, mais utilisables dans la décision et l'action. - Approche efficace lorsque les interactions sont non linéaires et fortes. - Conduit à un enseignement pluridisciplinaire. - Conduit à une action par objectifs. - Connaissance des buts, détails flous.
Démarche analytique	Démarche systémique
<ul style="list-style-type: none"> - Logique binaire disjonctive. - Causalité linéaire. - Orientée passé-présent. - Pour résoudre un problème, il faut d'abord connaître ses causes. - Centrée sur l'explication des dysfonctionnements et les handicaps du système. - Elle se nourrit du passé pour faire évoluer. - Le passé détermine le présent et le futur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Logique ternaire, conjonctive. - Causalité circulaire. - Orientée présent-futur. - Pour résoudre un problème, il faut d'abord clarifier l'objectif à atteindre. - Centrée sur les fonctions utiles des dysfonctionnements et sur les ressources du système. - Elle se nourrit du présent et le fait évoluer en fonction du but à atteindre. - La projection du futur souhaité influence le présent.

FIGURE F.1 – Comparaison des approches et démarches analytiques et systémiques [Yat18].

Annexe G

Verbatims

Cette annexe complète la section E.1.6.

G.1 STAMP

CL : et donc est-ce que vous utilisez d'autres instruments que le radar et ce ... fax?

RB : non, on n'a que ça

CL : il y a toujours moyen de s'en sortir ?

RB : non, de temps en temps il y en a qui prennent la grêle, quand même ... ça existe hein les avions qui passent dedans et qui sont gravelés

dès qu'ils se posent... on peut se poser la question du 447 hein quand même ?

[je montre des images écran que j'ai pris dans un documentaire d'Arte]

RB : super, mais nous on n'a vraiment __rien__ !

[...]

RB : de toutes façons on connaît la région, on sait que ça va cartonner...

on a les prévisions de cartographie, donc on sait que c'est par là, mais

on ne sait pas _exactement_, donc on se dit, ben on a un peu de bol, ou

on n'a pas de bol ...

[...]

CL : en imaginant que vous ayez ... imaginons que c'est le père Noël

et qu'il y a tout ce qui vous serait utile - en imaginant que vous ayez ce genre de visualisation ... donc comment ...

RB : c'est de la 3D qui nous intéresse

CL : ... d'accord ?

RB : idéalement c'est de la 3D parce que on a aussi un problème c'est que le radar ... on a d'énormes difficultés à savoir ... à calculer le niveau de l'écho. On y arrive, mais c'est pas trivial. C'est-à-dire qu'il faut faire des calculs, en fonction de notre assiette, en fonction du type du radar - donc le type c'est le réglage de l'antenne - en fonction de la distance de l'écho. Il faut faire une petite règle de 3, une multiplication un peu compliquée - on a ça dans nos documents - je ne sais pas où c'est ...

CL : et vous le faites à chaque fois ça ?

RB : non on ne le fait pas ! ... parce que en gros ... on évite de passer au-dessus de toutes façons. Et de toutes façons, par expérience, ils sont toujours plus hauts que nous. Parce que dans ces trucs-là, c'est la zone équatoriale, c'est là où ils sont le plus haut ... Passé le 390 c'est mort ...

CL : alors vous dites 3D ... ? mais en fait le RDT lui il restitue l'altitude partir des données satellites, il récupère la température, donc il a des les informations de hauteur [des cellules]

B : ben c'est formidable !

CL : par contre la question ce serait comment vous vous voudriez les voir ?

RB : attendez, je vais vous montrer quelque chose qui va vous intéresser ... [ouvre une page web] Regardez ça c'est espagnol ça ... je vous donnerai l'adresse

Bibliographie

- [AADR98] Carlos Agon, Gérard Assayag, Olivier Delerue, and Camilo Rueda. Objects, Time and Constraints in OpenMusic. In *Proc. ICMC 98, Ann Arbor, Michigan, I.C.M.A., San-Francisco, 1998.*, 1998.
- [ade19] Bientôt des vols avec un seul pilote grâce à Airbus? Technical report, Adentis, 2019. <https://www.adentis.fr/bientot-des-vols-avec-un-seul-pilote-grace-a-airbus/>.
- [ALvdH⁺15] Leonardo Angelini, Denis Lalanne, Elise van den Hoven, Ali Mazalek, Omar Abou Khaled, and Elena Mugellini. Tangible meets gestural : comparing and blending post-WIMP interaction paradigms. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction (TEI 2015)*. ACM, New York, NY, USA, pages 473–476, 2015.
- [AM17] I. Alexander and N. Maiden. *Scenarios, Stories, Use Cases : Through the Systems Development Life-Cycle*. Wiley, 2017.
- [Ari00] Aristote. *Physique*. Garnier Flammarion, 2000.
- [Aur02] Nicolas Auray. Ethos technicien et information. Simondon reconfiguré par les hackers. In Jacques Roux, editor, *Gilbert Simondon, Une pensée opérative*. Publications de l’Université de Saint Etienne, 2002.
- [Bac53] Gaston Bachelard. *Le Matérialisme rationnel*. PUF, 1953.
- [Bac04] B. Bachimont. Signes formels et computation numérique : entre intuition et formalisme. Critique de la raison computationnelle. In H. Schramm, L. Schwarte, and J. Lazardzig, editors, *Instrumente in Kunst und Wissenschaft - Zur Architektonik kultureller Grenzen im 17. Jahrhundert*, pages 0–0. Walter de Gruyter Verlag, 2004.

- [Bar06] Belinda Barnet. Engelbart's Theory of Technical Evolution. *Continuum*, 20(4) :509–521, 2006.
- [Bar15] J.H. Barthélémy. Glossaire Simondon : les 50 grandes entrées dans l'œuvre. *Appareil*, 16, 2015. mis en ligne le 09 février 2016 ; Cahiers Simondon (5).
- [Bau68] Jean Baudrillard. *Le système des objets*. Paris : Gallimard, 1968.
- [BB08] Jeffrey Bardzell and Shaowen Bardzell. Interaction Criticism : A Proposal and Framework for a New Discipline of HCI. In *CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pages 2463–2472, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [BB13] Jeffrey Bardzell and Shaowen Bardzell. What is "Critical" about Critical Design? In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3297–3306, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [BBE⁺02] Victoria Bellotti, Maribeth Back, W. Keith Edwards, Rebecca E. Grinter, Austin Henderson, and Cristina Lopes. Making sense of sensing systems : five questions for designers and researchers. In *Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology, Paris France*, pages 415–422. ACM Press, 2002.
- [BD97] V. Bellotti and P. Dourish. Rant and RAVE : Experimental and Experiential Accounts of a Media Space. In Sellen Finn and Wilbur, editors, *Video-Mediated Communication*, pages 245–272. New Jersey : LEA, 1997.
- [BDB⁺12] L. Bécouarn, J. Dominici, J. Bader, M. Fabbri, M. Pregnolato, K. Sarayeddine, D. Cuyppers, H. De Smet, A. Alapetite, N. Sgouros, P. Kouros, D. Zammit-Mangion, and M. F Pace. ODICIS (One Display for a Cockpit Interactive Solution) - Final public progress report. Technical report, ODICIS Consortium, 2012. <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/12840689/ODICIS.pdf>.

- [Bea15] V. Beaubois. Un schématisation pratique de l'imagination. *Appareil*, 16, 2015. <https://doi.org/10.4000/appareil.2247>, mis en ligne le 09 février 2016.
- [Ber77] Jacques Bertin. *Le graphique et le traitement graphique de l'information*. Paris : Flammarion, 1977. 273 pages.
- [Ber18] Françoise Berthoud. Enjeux environnementaux autour du numérique. Technical report, EcoInfo, 2018. https://graal.ens-lyon.fr/ejc2018/2018-11-12_EJC_Lyon_Berthoud.pdf, consulté en août 2021.
- [BH98] Hugh Beyer and Karen Holtzblatt. *Contextual Design : Defining Customer-Centered Systems*. San Francisco Morgan Kaufmann Publishers ISBN 1-55860-411-1 ; QA76.9.S88B493, 1998. 472 pages.
- [BHM⁺07] R. Benhacene, C. Hurter, A. Marion, B. Merlin, M.P. Rouselle, and P. Ribet. ASTER, tackling the problem of flight integration. In *7th ATM seminar Barcelone*, 2007.
- [BID09] Scott Brave, Hiroshi Ishii, and Andrew Dahley. Tangible interfaces for remote collaboration and communication. In *Proceedings of the 1998 ACM conference on Computer supported cooperative work*, pages 169–178. ACM, April 2009.
- [Bin15] Elisa Binda. Techno-esthétiques ou philosophies de l'interaction : les réflexions de Gilbert Simondon et John Dewey. *Appareil*, 16, 2015.
- [BJS14] Karl D. Bilimoria, Walter W. Johnson, and Paul C. Schutte. Conceptual framework for single pilot operations. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero '14)*. ACM New York, NY, USA, 2014.
- [BK11] Susanne Bødker and Clemens Nylandsted Klokmoose. The Human-Artifact Model : An Activity Theoretical Approach to Artifact Ecologies. *Human-Computer Interaction*, 26(4) :315–371, 2011.
- [BKH02] Nick Bryan-Kinns and Fraser Hamilton. One for All and All for One? Case Studies of Using Prototypes in Commercial Projects. In *Proceedings of the Second Nordic Conference*

- on Human-Computer Interaction*, NordiCHI '02, page 91–100, New York, NY, USA, 2002. Association for Computing Machinery.
- [BL00] Michel Beaudouin-Lafon. Instrumental interaction : An interaction model for designing post-wimp user interfaces. In *Proceedings of the ACM CHI 2000 Conference on Human Factors in Computing Systems, The Haag (NL), 1-6 April 2000*, April 2000.
- [BL04] Michel Beaudouin-Lafon. Designing Interaction, Not Interfaces. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces, AVI '04*, pages 15–22, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.
- [Bla03] A. Blackwell. Cognitive Dimensions of Tangible Programming Languages. In *Proceedings of PPIG 2003*, 2003.
- [BLBJ15] S. L. Brandt, J. Lachter, V. Battiste, and W. Johnson. Pilot Situation Awareness and its Implications for Single Pilot Operations : Analysis of a Human-in-the-Loop Study. *Procedia Manuf.*, 3 :3017–3024, August 2015.
- [BLCI21] Maxime Bardou, Catherine Letondal, Mickaël Causse, and Jean-Paul Imbert. Collaboration à distance et conscience mutuelle dans le cadre du single-pilot operation. In *32ème conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Apr 2021, Metz, France*, April 2021. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03232000>.
- [BLM02] Michel Beaudouin-Lafon and Wendy Mackay. Prototyping Tools and Techniques. In *The Human-Computer Interaction Handbook : Fundamentals, Evolving Technologies and Emerging Applications*, pages 1006–1031. L. Erlbaum Associates Inc., USA, 2002.
- [BLVP19] Valentin Becquet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, and Sylvain Pauchet. How do Gestures Matter for Mutual Awareness in Cockpits? Disclosing Interactions through Graphical Representations. In *DIS Designing Interactive Systems 2019, DIS '19 Proceedings of the 2019 on Designing Interactive Systems Conference*, pages 593–605, San Diego - California, United States, June 2019. ACM Press.

- [Bø89] Susanne Bødker. A Human Activity Approach to User Interfaces. *Hum.-Comput. Interact.*, 4(3) :171–195, September 1989.
- [Bod20] Charles Bodon. L'écriture comme corps de l'Être : essai sur le problème du signe chez Jacques Derrida. Technical report, Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2020. <https://www.researchgate.net/publication/349408509> [accessed Apr 18 2021].
- [Bon15] Vincent Bontems. Le cycle de la technologie chez Simondon. *Cahiers Simondon*, 6 :7–28, 2015.
- [Bon16a] V Bontems. *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [Bon16b] Vincent Bontems. L'énergétique de Simondon : progrès versus puissance. In *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*, pages 197–218. Klincksieck, 2016.
- [Bon16c] Vincent Bontems. Ressources simondoniennes pour une pensée du design. In *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [Bor84] A. Borgmann. *Technology and the Character of Contemporary Life*. Univ. of Chicago Press, 1984.
- [Bor00] Jan O. Borchers. A pattern approach to interaction design. In *Proceedings of the conference on Designing interactive systems : processes, practices, methods, and techniques (New York, August 16-19, 2000)*, ACM Press., pages 369 – 378, August 2000.
- [BPIH10] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, and C. Harrison. Teslatouch : Electroviibration for touch surfaces. In *UIST'10. ACM*, 2010.
- [BT01] Jan O. Borchers and John C. Thomas. Patterns : What's In It For HCI? In *Panel, Extended Abstracts of the CHI 2001 Conference on Human Factors in Computing Systems (Seattle, March 31-April 5, 2001)*, ACM Press, New York, 2001., April 2001.
- [Bun79] Mario Augusto Bunge. *Causality and Modern Science*. New York : Dover Publications, 1979.

- [Bux05] William Buxton. Innovation vs. Invention. *Rotman Magazine*, pages 52–53, 2005. <http://billbuxton.com/innovationInvention.pdf>.
- [Bux07a] Bill Buxton. *Sketching User Experiences : Getting the Design Right and the Right Design*. Elsevier / Morgan Kaufmann, 2007.
- [Bux07b] Bill Buxton. The Anatomy of Sketching. In Bill Buxton, editor, *Sketching User Experiences*, Interactive Technologies, pages 105–114. Morgan Kaufmann, Burlington, 2007.
- [BVL18] Bernadette Bensaude Vincent and Sacha Loeve. Toward a Philosophy of Technosciences. In Sacha Loeve, Xavier Guchet, and Bernadette Bensaude Vincent, editors, *French Philosophy of Technology : Classical Readings and Contemporary Approaches*, pages 169–186. Springer International Publishing, 2018.
- [BWM13] Jérôme Barbé, Marion Wolff, and Régis Mollard. Human centered design approach to integrate touch screen in future aircraft cockpits. In *Proc. of International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 429–438. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [BZD21] Stéphane Borraz, Valérie Zeitoun, and Delphine Dion. Subjectivité et réflexivité : les apports du contre-transfert aux recherches interprétatives. *Recherche et Applications en Marketing (French Edition)*, 36(1) :63–79, 2021.
- [Cad92] Claude Cadoz. Le geste canal de communication homme / machine. Models for gestual interactions. In *6th Autumn School, Man Machine Interaction*, page 39, Jouy-en-Josas, France, September 1992.
- [Car11] G. Carrozzini. Esthétique et techno-esthétique chez Simondon. *Cahiers Simondon*, 6, 2011.
- [Car16a] G Carrozzini. Design, conception et couplage. In *Gilbert Simondon et l’Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [Car16b] G Carrozzini. Simondon et le design du futur. In *Gilbert Simondon et l’Invention du futur, Actes de la décade des 5-15*

août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle. Klincksieck, 2016.

- [Cas98] Justine Cassell. A Framework For Gesture Generation And Interpretation. In R. Cipolla and A. Pentland, editors, *Computer Vision in Human-Machine Interaction*, pages 191–215. Cambridge University Press, 1998.
- [CBGPT19] Juan Cruz-Benito, Francisco J. García-Peñalvo, and Roberto Therón. Analyzing the software architectures supporting HCI/HMI processes through a systematic review of the literature. *Telematics and Informatics*, 38 :118–132, 2019.
- [CBNP08] Stéphane Conversy, Eric Barboni, David Navarre, and Philippe Palanque. Improving Modularity of Interactive Software with the MDPC Architecture. In *Engineering Interactive Systems : EIS 2007 Joint Working Conferences, EHCI 2007, DSV-IS 2007, HCSE 2007, Salamanca, Spain, March 22-24, 2007. Selected Papers*, pages 321–338, Berlin, Heidelberg, 2008. Springer-Verlag.
- [CBR13] D. Comerford, S. L. Brandt, and Mogford R. NASA’s Single-Pilot Operations Technical Interchange Meeting : Proceedings and Findings. Technical report, NASA, April 2013. NASA / CP - 2013 - 216513 NASA.
- [CCGBV14] Stéphane Conversy, Stéphane Chatty, Hélène Gaspard-Boulinç, and Jean-Luc Vinot. The Accident of Flight AF447 Rio-Paris : A Case Study for HCI Research. In *Proceedings of the 26th Conference on l’Interaction Homme-Machine, IHM ’14*, pages 60–69, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [CGBC⁺11] S. Conversy, H. Gaspard-Boulinç, S. Chatty, S. Valès, C. Dupré, and C. Ollagnon. Supporting air traffic control collaboration with a TableTop system. In *Proc. CSCW ’11. ACM*, 2011.
- [CGP⁺17] Andy Cockburn, Carl Gutwin, Philippe Palanque, Yannick Deleris, Catherine Trask, Ashley Coveney, Marcus Yung, and Karon MacLean. Turbulent Touch : Touchscreen Input for Cockpit Flight Displays. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ’17)*, pages 6742–6753, New York, NY, USA, 2017. ACM.

- [Cha07] Stéphane Chatty. Programs = data + algorithms + architecture, and consequences for interactive software. In *Proceedings of IFIP EIS 2007*, 2007. LNCS, Springer Verlag.
- [Cha08] Pierre Charrié. La beauté du Geste et la Machine. Technical report, ENSCI, 2008.
- [Cha12] Stéphane Chatty. Réconcilier conception d’interfaces et conception logicielle : vers la ”conception orientée-systèmes”. In *Proceedings of ERGO IHM 2012, Conférence Francophone sur l’Ergonomie et l’Interaction Homme-Machine, Oct 2012, Biarritz, France.*, October 2012.
- [CHL⁺13] Maxime Cordeil, Christophe Hurter, Rémi Lesbordes, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, and Stéphane Conversy. Tangible Encoding of Temporal Data in Air Traffic Control. In *CHI 2013 workshop, Avec le temps! : time, tempo, and turns in human-computer interaction*, Paris, France, April 2013.
- [Chr01] Anne-Marie Christin. *L’Image écrite ou la Déraison graphique*. Flammarion, 2001.
- [Châ08] J.Y Château. *Le vocabulaire de Simondon*. Editions Ellipses, 2008.
- [Cle] Cleansky. European aviation in the driving seat : Clean Sky’s Disruptive Cockpit for Large Passenger Aircraft. Technical report, Cleansky.
- [CLT18] Aymeric Le Calvez, Florian Liehn, and Sam Tobelem. Flying cities : a solution to make air travel compatible with environmental issues. Technical report, ENAC, 2018. Projet d’étudiant dans le cadre du Forum étudiants de l’association 3AF «Réinventons le futur du Transport Aérien».
- [CM04] Philip R. Cohen and David R. Mcgee. Tangible multimodal interfaces for safety-critical applications. *Commun. ACM*, 47(1) :41–46, 2004.
- [Com99] M. Combes. *Simondon, Individu et collectivité. Pour une philosophie du transindividuel*. PUF, coll. «Philosophies», 1999.
- [Cou87] Joëlle Coutaz. PAC : an Implementation Model for Dialog Design. In *Proceedings of the Interact’87 conference, September 14, 1987, Stuttgart, DE. North-Holland*, pages 431–436, 1987.

- [CR92] J. Carroll and M.B. Rosson. Getting around the task-artifact cycle : how to make claims and design by scenario. *ACM Trans. Inf. Syst.*, 10(2), 1992.
- [CS90] J.M. Corbin and A. Strauss. Grounded theory research : Procedures, canons, and evaluative criteria. *Qualitative Sociology*, 13(1) :3–21, 1990.
- [Csi96] Mihaly Csikszentmihalyi. *Creativity : Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. Harpercollins, 1996.
- [CSL⁺13] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. UltraHaptics : Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pages 505–514, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [CSR02] Patricia Collins, Shilpa Shukla, and David Redmiles. Activity theory and system design : A view from the trenches. *Computer Supported Cooperative Work*, 11 :55–80, 2002.
- [CVL⁺17] Bradley Camburn, Vimal Viswanathan, Julie Linsey, David Anderson, Daniel Jensen, Richard Crawford, Kevin Otto, and Kristin Wood. Design prototyping methods : state of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3, 2017.
- [CVL⁺21] Alma Cantu, Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Sylvain Pauchet, and Mickael Causse. Does folding improve the usability of interactive surfaces in future airliner cockpits? An evaluation under turbulent conditions and varying cognitive load. In *IHM'21, 32ème Conférence internationale francophone sur l'interaction homme-machine*, Metz, France, April 2021.
- [Cyp93] Allen Cypher. *Watch What I Do. Programming by Demonstration*. MIT Press, 1993.
- [CZMW⁺09] M. Clément-Ziza, C. Malabat, C. Weber, I. Moszer, T. Aitokallio, C. Letondal, and S. Rousseau. Genoscape : a Cytoscape plug-in to automate the retrieval and integration of gene expression data and molecular networks. *Bioinformatics*, 25(19) :2617–2618, 2009.
- [Dal14] Peter Dalsgaard. Pragmatism and Design Thinking. *International Journal of Design*, 8(1), 2014.

- [DAR14] DARPA. Alias seeks to provide portable, flexible advanced autopilot capabilities. Technical report, DARPA, 2014.
- [DD14] Peter Dalsgaard and Christian Dindler. Between Theory and Practice : Bridging Concepts in HCI Research. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, page 1635–1644, New York, NY, USA, 2014. Association for Computing Machinery.
- [Deb04a] Didier Debaise. Le langage de l'individuation. *Multitudes*, 18 :101–106, 2004.
- [Deb04b] Didier Debaise. Qu'est-ce qu'une pensée relationnelle? *Multitudes*, 18 :15–23, 2004.
- [Dec10] Gunnar Declerck. *Phénoménologie et psychologie du tangible. Éléments pour une théorie de la valeur cognitive et pratique de la résistance*. Theses, Université de Technologie de Compiègne, March 2010.
- [Der67] Jacques Derrida. *La voix et le phénomène*. Éditions de Minuit, Paris., 1967.
- [Der68] Jacques Derrida. Culture et écriture : la prolifération des livres et la fin du livre. In *Derrida's Library*. 1ère publication in *Noroi* 130 : 1 (August - September 1968), 5-12., 1968.
- [Der14] Emilien Dereclenne. De Merleau-Ponty à Simondon : la valeur épistémologique de la notion de norme. *Cahiers Simondon*, 6, 2014.
- [Der19] Emilien Dereclenne. Simondon and enaction : the articulation of life, subjectivity, and technics. *Adaptive Behavior*, July 2019.
- [Dev67] Georges Devereux. *From Anxiety to Method in the Behavioral Sciences*. The Hague : Mouton&Co, 1967.
- [DF04] Pierre Dragicevic and Jean-Daniel Fekete. The input configurator toolkit : Towards high input adaptability in interactive applications. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, AVI '04, pages 244–247, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.
- [DGM+01] G. Dubey, X. Guchet, M. Maestrutti, J. Potthast, and S. Poirot-Delpech. Quand les avions entrent dans la salle. La sécurité

- telle qu'elle se fait. Une comparaison socio-anthropologique Italie/Allemagne/France. Technical report, Centre expérimental EUROCONTROL, 2001. Rapport final, projet Look.
- [DJM21] Pierre Dragicevic, Yvonne Jansen, and Andrew Vande Moere. Data physicalization. In Jean Vanderdonckt, editor, *Springer Handbook of Human Computer Interaction*. Springer, In press, 2021.
- [DM06] G. Dubey and C. Moricot. La polyvalence du Rafale ou l'objet total : la relation entre une technologie nouvelle et ses utilisateurs. Technical report, Centre d'études en sciences sociales de la défense, 2006. Les Documents du C2SD.
- [Dou01] Paul Dourish. *Where the Action Is. The Foundations of Embodied Interaction*. MIT Press, 2001.
- [dR75] Joël de Rosnay. *Le Macroscopie : Vers une vision globale*. Paris, Éditions du Seuil, coll. Points / Essais (no 80)., 1975.
- [dS16] Ferdinand de Saussure. *Cours de linguistique générale*. Paris, Payot, coll. Grande bibliothèque Payot, 1916.
- [dS12] Clarisse Sieckenius de Souza. Semiotics. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2012.
- [dsed20] Collectif de scientifiques et d'écrivains. *Nos futurs. Imaginer les Possibles du Changement Climatique*. ActusF. Collection Les Trois Souhais., 2020. <https://www.editions-actusf.fr/a/collectifd-auteur/nos-futurs>.
- [Dub13] G. Dubey. Toucher le virtuel : une nouvelle anthropologie. sur quelques enjeux anthropologiques du phénomène de tangibilité dans les environnements numériques. *SociologieS*, 2013. <http://sociologies.revues.org/4294>.
- [Duh10] Ludovic Duhem. Introduction à la techno-esthétique. *Archée, revue de théorie et de critique d'art numérique*, January 2010.
- [Duh13] Ludovic Duhem. Penser le numérique avec Simondon. *NepH, Nouvelle revue de Philosophie, N° spécial « Philosophie du numérique »*, 2013.
- [Duh16a] Ludovic Duhem. La réticulation du monde. Simondon penseur des réseaux. In *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.

- [Duh16b] Ludovic Duhem. Vers une techno-esthétique. *Archée, revue de théorie et de critique d'art numérique*, January 2016.
- [EG88] D. Engelbart and A. Goldberg. The Augmented Knowledge Workshop. In *A History of Personal Workstations*. ACM Press, New York, pages 185–249, 1988. Presented at the National Computer Conference, June 4-8, 1973, AFIPS Conference Proceedings, Vol. 42, pp. 9-21.
- [EK95] M. R. Endsley and E. O. Kiris. The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors*, 37(2) :381–394, 1995.
- [Ell77] Jacques Ellul. *Le Système technicien*. Calmann-Lévy, 1977.
- [Eng62] D Engelbart. Augmenting Human Intellect : a Conceptual Framework. Technical report, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, October 1962. Report to the Director of Information Sciences, Air Force Office of Scientific Research.
- [Eng90] Yrjö Engeström. *Learning, working and imagining : Twelve studies in activity theory*. Orienta-konsultit, 1990.
- [Eng91] Douglas C. Engelbart. *Letter to Vannevar Bush and Program of Human Effectiveness*, pages 235–244. Academic Press Professional, Inc., USA, 1991.
- [Esc20] Oscar Eschenbrenner. Cartographie de controverse : transport aérien et lutte contre le changement climatique, quel avenir pour le transport de passagers en France? Master's thesis, École nationale de l'aviation civile (ENAC), 7 avenue Édouard Belin, 31400 Toulouse; Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace (ISAE-SUPAERO), 10 avenue Édouard Belin, 31055 Toulouse, September 2020. La formation est délivrée par Sciences Po Paris - Campus de Reims.
- [Fal03] Daniel Fallman. Design-Oriented Human-Computer Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '03, pages 225–232, New York, NY, USA, 2003. Association for Computing Machinery.
- [Fal11] Daniel Fallman. The New Good : Exploring the Potential of Philosophy of Technology to Contribute to Human-Computer Interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Hu-*

- man Factors in Computing Systems*, pages 1051–1060, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [Fau06] Christian Fauré. Hypomnemata : supports de mémoire, July 2006. <http://www.christian-faure.net/2006/07/16/une-question-de-mmoire/>, dernier accès en juillet 2021.
- [Fee02] A. Feenberg. *Critical Theory of Technology. Second Edition*. Oxford University Press, 2002.
- [Fer19] Coline Ferrarato. *Philosophie prospective du logiciel*. ISTE Editions. Série prospective technologique et application sociale. Volume 3., 2019.
- [Fis14] Paul A. Fishwick. Aesthetic Computing. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2014.
- [Fit96] George W. Fitzmaurice. *Graspable User Interfaces*. PhD thesis, University of Toronto, CAN, 1996. AAINN18871.
- [FLO⁺13] Sean Follmer, Daniel Leithinger, Alex Olwal, Akimitsu Hogge, and Hiroshi Ishii. InFORM : Dynamic Physical Affordances and Constraints through Shape and Object Actuation. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, pages 417–426, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
- [Fog02] B. J. Fogg. Persuasive Technology : Using Computers to Change What We Think and Do. *Ubiquity*, 2002(December), December 2002.
- [Fox15] Tyler S. Fox. Prehensive transduction : Techno-aesthetics in new media art. *Journal of Media and Communication*, 6 :96–107, 2015.
- [FR91] Robert S. Feldman and Bernard Rimé, editors. *Fundamentals of nonverbal behavior*. Cambridge University Press, 1991.
- [FRHC18] Stephanie Fleck, Guillaume Rivière, Regina Paola Ticona Herrera, and Nadine Couture. Classifier les interfaces tangibles par la cladistique : critères et fiches pour un inventaire collaboratif. In *Résumés étendus, Actes de la 31e Conference Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'18, Brest, France*, 2018.

- [GA12] Boy Guy A. What do we mean by Human-Centered Design of Life-Critical Systems? In *Proceedings of the 2012 IEA World Congress on Ergonomics, Recife, Brazil, 2012*.
- [GB17] Hélène Gaspard-Boulinc. *Une ingénierie participative des exigences pour les systèmes interactifs complexes en aéronautique*. Theses, Université Paul Sabatier - Toulouse III, December 2017.
- [GBC17] Hélène Gaspard-Boulinc and Stéphane Conversy. Usability Insights for Requirements Engineering Tools : A User Study with Practitioners in Aeronautics. In *RE 2017 IEEE 25th International Requirements Engineering Conference, Sep 2017, Lisbonne, Portugal*. IEEE, September 2017.
- [GBCP⁺13] Hélène Gaspard-Boulinc, Stéphane Conversy, Daniel Prun, Catherine Letondal, and Stéphane Chatty. Former les futurs concepteurs de systèmes homme-machine complexes. In *IHM 2013, 25 eme conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, Bordeaux, France, November 2013. AFIHM, ACM.
- [GHJV95] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, and John Vlissides. *Design Patterns, Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison Wesley, 1995.
- [Gib86] James J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Routledge, 1986.
- [Gir00] Patrick Girard. *Ingénierie des systèmes interactifs : vers des méthodes formelles intégrant l'utilisateur*. PhD thesis, Université de Poitiers, 2000. Habilitation à diriger les recherches.
- [Gir19] Guillaume Giroud. Mythes et limites de la symbiose en IHM. In *R esum es  tendus, Actes de la 31e Conference Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'19, 10-13 décembre 2019, Grenoble*, December 2019.
- [Gir20] Guillaume Giroud. Toucher l'interface, interfacer le toucher. In *IMPEC 2020 : Interactions Multimodales Par ECran - Les sensorialités*, 2020.
- [Gir21] Guillaume Giroud. L'interface de la représentation, représentations de l'interface. *Interfaces numériques*, 10(1), 2021.
- [GKL⁺07] J. Goldman, P. Klanac, P. Leroux, B. Mantovani, C. P. Harman, K. Torstensson, B. Current, M. Lanza, J.-F. Laporte, and

- J. M. Staud. Enquête : neuf idées musicales. *Circuit*, 17(1) :67–77, 2007.
- [GMD⁺14] Yoann Gauthier, Joran Marcy, David Duprat, Alexis Paoleschi, Catherine Letondal, Rémi Lesbordes, Jean-Luc Vinot, and Christophe Hurter. Interactions gestuelles pour Strip’TIC, un environnement tangible pour les contrôleurs aériens. In *IHM 2014, 26th International Conference of "Association Francophone d’Interaction Homme-Machine"*, Villeneuve d’Ascq, France, October 2014.
- [GMPDS91] A. Gras, C. Moricot, S. Poirot-Delpech, and V. Scardigli. *Le Pilote, le contrôleur et l’automate*. Paris, Éditions Iris/CNRS, 1991.
- [GMPDS95] A. Gras, C. Moricot, S. Poirot-Delpech, and V. Scardigli. *Face à l’automate, le pilote, le contrôleur et l’ingénieur*. Paris, Presses de la Sorbonne, 1995.
- [GNGG03] J.Y. Grau, J. Nobel, L. Guichard, and G. Gawinoski. Dynastrip : a time-line approach for improving the air traffic picture of controllers. In *Proc. of DASC ’03, vol.1.*, pages 12–16, 2003.
- [Goo79] Jack Goody. *La raison graphique. La domestication de la pensée sauvage*. Trad. J. Basin & A. Bensa. Paris, Les éditions de minuit, 1979.
- [GP11] G. Goeminne and E. Paredis. Opening up the in-between : Ihde’s Postphenomenology and Beyond. *Foundations of Science*, 16 :101–107, 2011.
- [Gro16a] J Grosman. La concrétisation de la philosophie de la technique de Simondon et le constructivisme : une contribution réursive à la théorie de la concrétisation. In *Gilbert Simondon et l’Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [Gro16b] J Grosman. Simondon et l’Informatique II. In *Gilbert Simondon et l’Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [Guc10] Xavier Guchet. *Pour un humanisme technologique. Culture, technique et société dans la philosophie de Gilbert Simondon*. Presses Universitaires de France, 2010.

- [Gué95] Michel Guérin. *Philosophie du geste*. Arles, Actes Sud, 1995.
- [Hal02] Christine A. Halverson. Activity Theory and Distributed Cognition : Or What Does CSCW Need to DO with Theories? *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 11(1) :243–267, 2002.
- [har] HARVIS : Human Aircraft Roadmap for Virtual Intelligent System. <http://www.harvis-project.eu>.
- [HAR16] Joel E. Fischer Huseyin Avsar and Tom Rodden. Future flight decks : impact of+ Gz on touchscreen usability. In *HCI-Aero 2016, International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, Paris, France, September 2016. ACM.
- [Hat16] Armand Hatchuel. Objets techniques, objets d’esprit : de Simondon à la théorie de la conception. In *Gilbert Simondon et l’Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [Hay99] K. Hayles. *How We Became Posthuman : Virtual Bodies in Cybernetics, Literature and Informatics*. University of Chicago Press, 1999.
- [HB06] Eva Hornecker and Jacob Buur. Getting a grip on tangible interaction : A framework on physical space and social interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 437–446, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.
- [HEG⁺11] Christophe Hurter, Paul Edouard, Vincent Gaits, Hasna Nadfaoui, Jérôme Pailler, Catherine Letondal, and Stéphane Conversy. Étude exploratoire du stylo électronique pour le contrôle aérien. In *IHM 2011, 23ème Conférence Francophone sur l’Interaction Homme-Machine*, page Article N° 15, Nice, France, October 2011.
- [Hei27] Martin Heidegger. *Être et temps, Trad. de l’allemand par Rudolf Boehm et Alphonse de Waelhens, 1964*. Collection Bibliothèque de Philosophie, Gallimard, 1927.
- [Hei46] Martin Heidegger. Lettre sur l’humanisme. In *Questions III et IV, 1966-1976*, pages 65–127. Gallimard, 1946.

- [Hei58] Martin Heidegger. La question de la technique. In *Essais et conférences, coll. « Tel », trad. André Préau*, pages 9–48. Paris, Gallimard, 1958.
- [HGBS15] Sylvain Hourlier, Sandra Guérard, Jean-Luc Barou, and Xavier Servantie. Testing touch screens in realistic aeronautic turbulent conditions (light to severe). *SAE International Journal of Aerospace*, 8, 2015.
- [HH91] R.H.R. Harper and J. A. Hughes. What a f-ing system! Send 'em all to the same place and then expect us to stop 'em hitting' : Making Technology Work in Air Traffic Control. Technical report, Technical Report EPC-1991-125, 1991.
- [HH03] S. Houde and C. Hill. What do prototypes prototype? In *Handbook of Human-Computer Interaction (2nd Ed.)*. Elsevier Science B. V : Amsterdam, 2003.
- [HHK00] James Hollan, Edwin Hutchins, and David Kirsh. Distributed Cognition : Toward a New Foundation for Human-Computer Interaction Research. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 7 :174–196, 2000.
- [Hic90] Larry A. Hickman. *John Dewey's pragmatic technology*. Bloomington. Indiana university press., 1990.
- [HK96] E. Hutchins and T. Klausen. Distributed cognition in an airline cockpit. In Y. Engeström and D. Middleton, editors, *Cognition and Communication at Work*, pages 15–34. Cambridge : Cambridge University Press, 1996.
- [HL93] C. C. Heath and P. Luff. Disembodied conduct : Interactional asymmetries in video mediated communication. In G. Button, editor, *Technology in working order : Studies of work, interaction, and technology*. New York, NY : Routledge, 1993.
- [HL12] Kristina Höök and Jonas Löwgren. Strong Concepts : Intermediate-Level Knowledge in Interaction Design Research. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 19(3), October 2012.
- [HLL⁺12a] Christophe Hurter, Rémi Lesbordes, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, and Stéphane Conversy. Strip-TIC : exploring augmented paper strips for Air Traffic Controllers. In *Proceedings of AVI 2012, International Working Conference on Advanced*

- Visual Interfaces*, pages pp 225–232, Capri Island, Italy, May 2012.
- [HLL⁺12b] Christophe Hurter, Rémi Lesbordes, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, and Stéphane Conversy. Strip-TIC : exploring augmented paper strips for Air Traffic Controllers. In *AVI 2012, International Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, pages pp 225–232, Capri Island, Italy, May 2012.
- [HM14] Harry Halpin and Alexandre Monnin. *Philosophical Engineering : Toward a Philosophy of the Web*. Wiley Publishing, 1st edition, 2014.
- [HO17] Kasper Hornbæk and Antti Oulasvirta. What is interaction ? In *Proceedings of the ACM CHI 2017, May 06-11, 2017, Denver, CO, USA*, May 2017.
- [Hol14] Erik Hollnagel. *Safety-I and Safety-II. The Past and Future of Safety Management*. Ashgate, 2014.
- [Hoo14] Branden Hookway. *Interface*. MIT Press, 2014.
- [Hor12] E. Hornecker. Beyond affordance : tangibles’ hybrid nature. In *Proceedings of TEI’12*, 2012.
- [Hot84] Gilbert Hottois. *Le signe et la technique : la philosophie à l’épreuve de la technique*. Librairie philosophique J. Vrin, 1984.
- [HOWV18] Sabrina Hauser, Doenja Oogjes, Ron Wakkary, and Peter-Paul Verbeek. An Annotated Portfolio on Doing Postphenomenology Through Research Products. In *Proceedings of the 2018 Designing Interactive Systems Conference, DIS ’18*, pages 459–471, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [HP97] Edwin Hutchins and Leysia Palen. Constructing meaning from space, gesture, and speech. In *Discourse, tools and reasoning*, pages 23–40. Springer, 1997.
- [HPVW05] H. Lieberman Henry, F. Paterno, and eds. V. Wulf. *End-User Development*. Springer, 2005, 2005.
- [HRL99] L. Holmquist, J. Redstrom, and P. Ljungstrand. Token-based access to digital information. In *In Proc. of Handheld and Ubiquitous Computing, HUC’99.*, 1999.

- [Hui16] Yuk Hui. *On The Existence of Digital Objects*. University of Minnesota Press, 2016.
- [ica12] Aviation system block upgrade modules relating to trajectory-based operations, 12th Air Navigation Conference. Technical report, ICAO, May 2012.
- [Ihd79] Don Ihde. *Technics and Praxis*. D. Reidel Publishing Company, 1979. 150 pages.
- [Ihd90] Don Ihde. *Technology and the lifeworld : from garden to earth*. Bloomington : Indiana University Press, 1990.
- [Ing13] T. Ingold. *Making, anthropology, archaeology, art and architecture*. London, England : Routledge, 2013.
- [JA18] Mads Møller Jensen and Jesper Aagaard. A Postphenomenological Method for HCI Research. In *Proceedings of the 30th Australian Conference on Computer-Human Interaction, OzCHI '18*, pages 242–251, New York, NY, USA, 2018. Association for Computing Machinery.
- [Jac19] Michael C. Jackson. *Critical Systems Thinking and the Management of Complexity*. Wiley, 2019.
- [JS11] Heekyoung Jung and Erik Stolterman. Form and Materiality in Interaction Design : A New Approach to HCI. In *CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '11*, pages 399–408, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [JS12] Heekyoung Jung and Erik Stolterman. Digital Form and Materiality : Propositions for a New Approach to Interaction Design Research. In *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction : Making Sense Through Design, NordiCHI '12*, pages 645–654, New York, NY, USA, 2012. Association for Computing Machinery.
- [JS15] L.-E. Janlert and E. Stolterman. Faceless interaction - a conceptual examination of the notion of interface : past, present and future. *Human-Computer Interaction*, 30(6) :507–539, 2015.
- [Jul12] François Jullien. *L'écart et l'entre. Leçon inaugurale de la Chaire sur l'altérité, 8 décembre 2011*. Paris : Editions Galilée, 2012.

- [JWWS17] Heekyoung Jung, Heather Wiltse, Mikael Wiberg, and Erik Stolterman. Metaphors, materialities, and affordances : Hybrid morphologies in the design of interactive artifacts. *Design Studies*, 53 :24–46, 2017.
- [Kan90] Emmanuel Kant. *Critique de la faculté de juger, traduction d'Alain Renaut 2000*. Flammarion, coll. « GF », 1790.
- [Kap91] Mitchell Kapor. A Software Design Manifesto. *Dr. Dobb's. the World of Software Development*, 1991. <https://www.drdoobs.com/a-software-design-manifesto/184408473>.
- [Kay93] Alan C. Kay. *The early history of Smalltalk*. HOPL Preprints, 1993.
- [KBNR03] Boriana Koleva, Steve Benford, Kher Hui Ng, and Tom Rodden. A framework for tangible user interfaces. In *Physical Interaction (PI03) Workshop on Real World User Interfaces*, pages 46–50, 2003.
- [Kei08] Turkka Keinonen. User-Centered Design and Fundamental Need. In *Proceedings of the 5th Nordic Conference on Human-Computer Interaction : Building Bridges*, NordiCHI '08, pages 211–219, New York, NY, USA, 2008. Association for Computing Machinery.
- [Ken04] Adam Kendon. *Visible action as utterance*. Cambridge University Press, 2004.
- [KHT06] S. R Klemmer, B. Hartmann, and L. Takayama. How bodies matter : five themes for interaction design. In *In Proceedings of DIS 2006 ACM 140-149*, 2006.
- [Kir95] D. Kirsh. The intelligent use of space. *Artificial Intelligence.*, 73 :31–68, 1995.
- [Kir09] D. Kirsh. Interaction, External Representation and Sense Making. In N. A. Taatgen & H. van Rijn, editor, *Proceedings of the 31st Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pages 1103–1108, Austin TX, 2009. Lawrence Erlbaum.
- [KKL14] Hyosun Kwon, Hwan Kim, and Woohun Lee. Intangibles wear materiality via material composition. *Personal Ubiquitous Comput.*, 18(3) :651–669, March 2014.

- [KM94] D. Kirsh and P. Maglio. On distinguishing epistemic from pragmatic action. *Cognitive Science*, 18 :513–49, 1994.
- [Km05] Maria Karam and m.c schraefel. A taxonomy of gestures in human computer interactions. Technical report, Electronics and Computer Science, University of Southampton, 2005.
- [KN12] Victor Kaptelinin and Bonnie Nardi. Activity Theory in HCI : Fundamentals and Reflections. In John M. Carroll, editor, *Synthesis Lectures on Human-Centered Informatics*. Morgan & Claypool Publishers, April 2012.
- [Kur16] Michael Kurtov. L'évolution des langages de programmation à la lumière de l'allagmatique. In *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [KW07] Vaiva Kalnikaitė and Steve Whittaker. Software or wetware? : discovering when and why people use digital prosthetic memory. In *CHI '07 : Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pages 71–80, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [KW08] Vaiva Kalnikaitė and Steve Whittaker. Cueing digital memory : how and why do digital notes help us remember? In *BCS-HCI '08 : Proceedings of the 22nd British HCI Group Annual Conference on HCI 2008*, pages 153–161, Swinton, UK, UK, 2008. British Computer Society.
- [KZ10] Clemens Nylandsted Klokmoose and Pär-Ola Zander. Rethinking laboratory notebooks. In *Proceedings of the 9th International Conference on the Design of Cooperative Systems (COOP 2010)*, 2010.
- [LA04] Catherine Letondal and Olivier Amanatian. Participatory Design of Pipeline tools and Web services in bioinformatics. In *Requirements Capture for Collaboration in eScience*, Edinburgh, United Kingdom, January 2004.
- [Lat13] B Latour. "gaïa global circus", une tragi-comédie climatique. *Philosophie Magazine*, November 2013.
- [LBB⁺04] Joel Lachter, Summer L. Brandt, Vernol Battiste, Michael Mattessa, and Walter W. Johnson. Enhanced ground support :

- lessons from work on reduced crew operations. *Cognition, Technology Work*, 19(2-3) :279–288, 2004.
- [LBB⁺14] Joel Lachter, Summer L. Brandt, Vernol Battiste, Sarah V. Ligda, Michael Matessa, and Walter W. Johnson. Toward single pilot operations : developing a ground station. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero '14)*. ACM, 2014.
- [LBM⁺14] Joel Lachter, Vernol Battiste, Michael Matessa, Quang V. Dao, Robert Koteskey, and Walter W. Johnson. Toward single pilot operations : the impact of the loss of non-verbal communication on the flight deck. In *Proceedings of the International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace (HCI-Aero '14)*. ACM, 2014.
- [LCP⁺10] Catherine Letondal, Stéphane Chatty, Greg Philips, Fabien André, and Stéphane Conversy. Usability requirements for interaction-oriented development tools. In *PPIG 2010, 22nd Annual Workshop on the Psychology of Programming Interest Group*, Madrid, Spain, September 2010.
- [LDS04] Mauro Lanza, Nicolas Donin, and Bernard Stiegler. Retour du refoulé : la contrainte instrumentale en milieu informatique. *Cahiers de médiologie*, 18 :159–164, 2004.
- [LEJ17] Erik Stolterman Lars-Erik Janlert. *Things that keep us busy : the elements of interaction*. MIT Press, 2017.
- [Lep53] J. Leplat. Travaux récents de « technologie humaine » (human engineering). *L'année psychologique*, 53(2) :517–537, 1953.
- [Let99a] Catherine Letondal. Ateliers de conception participative de logiciels pour les biologistes. Technical report, Institut Pasteur, Paris., 1999. publié dans le B6, bulletin de l'informatique scientifique.
- [Let99b] Catherine Letondal. Une approche pragmatique de la programmation pour des biologistes qui programment presque. In *Proceedings d'IHM'99*, 1999. english version for CHI'99 Workshop on End-User Programming and Blended-User Programming.
- [Let00a] Catherine Letondal. Tests d'interface homme-ordinateur avec le bionetbook. Technical report, Institut Pasteur, Paris., 2000. publié dans le B6, bulletin de l'informatique scientifique.

- [Let00b] Catherine Letondal. A web interface generator for molecular biology programs in unix. *Bioinformatics*, 17(1) :73–82, 2000.
- [Let01a] Catherine Letondal. biok : Biology interactive object kit. In *BOSC2001, Bioinformatics Open Source Conference*, 2001. Présentation orale.
- [Let01b] Catherine Letondal. *Programmation et interaction*. PhD thesis, Université de Paris XI, Orsay, 2001.
- [Let05] Catherine Letondal. Participatory programming : Developing programmable bioinformatics tools for end-users. In H. Lieberman Henry, F. Paterno, and V. Wulf, editors, *End-User Development*. Springer, 2005, 2005.
- [Let12] Catherine Letondal. Strip’TIC : un espace interactif tangible pour les contrôleurs aériens. Forum sur l’Interaction Tactile et Gestuelle (FITG’12), 2012. <https://www.youtube.com/watch?v=fIB4D0NTXJY>.
- [Let19] Catherine Letondal. Transduction as a paradigm for a re-integration of human technology into culture. In *Exploring the Intersection of Philosophy and HCI. Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Glasgow, United Kingdom, May 2019.
- [Lev90] Pierre Levy. *Les technologies de l’intelligence*. La Découverte, Paris, 1990.
- [LG65] André Leroi-Gourhan. *Le Geste et la Parole*. Albin Michel, 1965.
- [LHL⁺13] Catherine Letondal, Christophe Hurter, Rémi Lesbordes, Jean-Luc Vinot, and Stéphane Conversy. Flights in my hands : coherence concerns in designing Strip’TIC, a tangible space for air traffic controllers. In *CHI 2013, SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages pp 2175–2184, Paris, France, April 2013. Best Paper Honorable Mention award.
- [Lic60] R. Licklider. Man-computer symbiosis. *IRE Transactions on Human Factors in Electronics, HFE-1*, 1 :4–11, March 1960.
- [Lie00] Henry Lieberman, editor. *Your Wish is My Command : Giving Users the Power to Instruct their Software*. Morgan Kaufmann, 2000.

- [LLDC20] Stephan Lukosch, Heide Lukosch, Dragos Detcu, and Marina Cidota. Providing information on the spot : Using augmented reality for situational awareness in the security domain. *Comput. Supported Coop. Work*, 24(6) :613–664, December 2020.
- [LM04] C. Letondal and W. E. Mackay. Participatory programming and the scope of mutual responsibility : Balancing scientific, design and software commitment. In *Proceedings of the 8th biennial Participatory Design Conference (PDC 2004), July 27-31, 2004 - Toronto, Canada*, pages 31–41. ACM, July 2004.
- [LM09] C. Letondal and W. E. Mackay. L’écriture augmentée : enregistrer des explorations interactives avec une feuille de données scientifiques. In *Proceedings of the 21ème Conférence Francophone sur l’Interaction Homme-Machine (IHM 2009), Grenoble, France*, October 2009.
- [LMD07] Catherine Letondal, Wendy E. Mackay, and Nicolas Donin. Paperoles et musique. In *Actes de la Conférences IHM*, October 2007.
- [Loe16] Sacha Loeve. Du récit au *design* et retour (des modes de résolution du problème de l’unité de la technologie chez Simondon). In *Gilbert Simondon et l’Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [LPV⁺14] Catherine Letondal, Pierre-Yves Pillain, Emile Verdurand, Daniel Prun, and Olivier Grisvard. Of Models, Rationales and Prototypes : Studying Designer Needs in an Airborne Maritime Surveillance Drawing Tool to Support Audio Communication. In *HCI 2014, 28th BCS International Conference on Human-Computer Interaction*, page pp 8, Southport, United Kingdom, September 2014.
- [LS04] Jonas Löwgren and Erik Stolterman. *Thoughtful Interaction Design. A Design Perspective on Information Technology*. MIT Press, 2004.
- [LSNM07] S. Loft, P. Sanderson, A. Neal, and M. Mooij. Modeling and predicting mental workload in en route air traffic control : critical review and broader implications. *Human Factors*, 49(3), June 2007.

- [LST08] Youn-Kyung Lim, Erik Stolterman, and Josh Tenenber. The anatomy of prototypes : Prototypes as filters, prototypes as manifestations of design ideas. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 15(2), July 2008.
- [LTM09] Catherine Letondal, Aurélien Tabard, and Wendy E. Mackay. Quand tu l'as écrit, tu l'as lu! Research Report 1526, Laboratoire de Recherche en Informatique (LRI), September 2009.
- [Lua20] Scott Luan. Towards a phenomenological grammar of human-technology relations. In *Proceedings of the Philosophy of Human-Technology Relations 2020 (PHTR2020)*, DesignLab of the University of Twente, November 2020.
- [LVP⁺18] Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Sylvain Pauchet, Caroline Boussiron, Stéphanie Rey, Valentin Becquet, and Claire Lavenir. Being in the Sky : Framing Tangible and Embodied Interaction for Future Airliner Cockpits. In *TEI 2018 12th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interactions*, Stockholm, Sweden, March 2018.
- [LVPL19] Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Sylvain Pauchet, and Sébastien Leriche. Exploring a touch-based flight control panel for pilots using tangible design principles. In *INAIR 2019, 8th International Conference on Air Transport*, volume 43 of *Transportation Research Procedia*, pages pp 257–268, Reno, NV, United States, June 2019. Elsevier.
- [LZ03] Catherine Letondal and Uwe Zdun. Anticipating Scientific Software Evolution as a Combined Technological and Design Approach. In *USE'03 Second International Workshop on Unanticipated Software Evolution, ETAPS 2003*, Warsaw, Poland, 2003.
- [LZVC15] Catherine Letondal, Cédric Zimmerman, Jean-Luc Vinot, and Stéphane Conversy. 3D Visualization to Mitigate Weather Hazards in the Flight Deck : Findings from a User Study. In *3DUI 2015, 3DUI 2015 IEEE 10th Symposium on 3D User Interfaces*, Arles, France, March 2015. IEEE.
- [M36] Mauss M. Les techniques du corps. *Journal de psychologie*, 32 :363–386, 1936.

- [Mac91] Wendy E. Mackay. Triggers and barriers to customizing software. In *Proceedings of ACM CHI'91 Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 153–160. ACM Press, 1991.
- [Mac99] Wendy E. Mackay. Is paper safer ? the role of paper flight strips in air traffic control. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 6(4) :311–340, December 1999.
- [Mac02] A. Mackenzie. *Transductions*. London : Continuum, 2002.
- [Mac15] Wendy Mackay. The Interaction Museum, 2015. <https://hci-museum.lri.fr>, dernier accès en septembre 2021.
- [MB16] Vincent Minier and Vincent Bontems. Simondon et l'innovation. In *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*. Klincksieck, 2016.
- [MC12] Yves Michaud and Justin Clemens. The Aesthetics of Gilbert Simondon : Anticipation of the Contemporary Aesthetic Experience. In Arne De Boever, Alex Murray, Jonathan Roffe, and Ashley Woodward, editors, *Gilbert Simondon : Being and Technology*. PUF, Paris, 2012. visité le 30/4/2016.
- [MC15] Mathieu Magnaudet and Stéphane Chatty. Quel cadre épistémologique pour une science de l'interaction homme-machine ? In *Actes des Neuvièmes Journées sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'2015, Toulouse, France*, October 2015.
- [MCC⁺18] Mathieu Magnaudet, Stéphane Chatty, Stéphane Conversy, Sébastien Leriche, Celia Picard, and Daniel Prun. Djnn/smala : A conceptual framework and a language for interaction-oriented programming. *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, 2(EICS), June 2018.
- [MCP⁺06] Michael McCurdy, Christopher Connors, Guy Pyrzak, Bob Kanevsky, and Alonso Vera. Breaking the fidelity barrier : An examination of our current characterization of prototypes and an example of a mixed-fidelity success. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1233–1242, New York, NY, USA, 2006. Association for Computing Machinery.

- [MD14] Alexandre Monnin and Gunnar Declerck. Philosophie du Web et Ingénierie des Connaissances. *Intellectica*, 1(61) :7–40, 2014.
- [MF97] W.E. Mackay and A.L. Fayard. Natural science and design : A framework for triangulation across disciplines. In *Procs. of DIS'97 : Designing Interactive Systems (August 18-20, 1997) ACM : Amsterdam.*, pages 223–234. ACM Press, 1997.
- [MFFM98] W.E. Mackay, A.L. Fayard, L. Frobert, and L. Médini. Reinventing the familiar : exploring an augmented reality design space for air traffic control. In *Proceedings of CHI '98*. ACM Press, 1998.
- [MGM⁺94] B. Myers, D. Giuse, A. Mickish, B. Vander Zanden, D. Kosbie, R. McDaniel, J. Landay, M. Golderg, and R. Pathasarathy. The Garnet user interface development environment. In *CHI'94 Conference companion*, pages 457–458. ACM, 1994.
- [Mil84] John William Miller. *The Midworld Of Symbols And Functioning Objects*. W. W. Norton and Company, Inc., 1984.
- [Mil98] D. Miller. *Material cultures : why some things matter*. The University of Chicago Press, 1998.
- [Mil11] S. Mills. Concrete Software : Simondon's mechanology and the techno-social. *The Fiberculture Journal*, 2011(18), 2011.
- [Mit94] Carl Mitcham. *Thinking through technology. The path between Engineering and Philosophy*. The University of Chicago Press, 1994.
- [Moi77] Jean-Louis Le Moigne. *La théorie du système général. Théorie de la modélisation*. PUF, 1977.
- [Mor90] Edgar Morin. *Introduction à la pensée complexe*. Paris : Ed. Du Seuil., 1990.
- [MP45] Maurice Merleau-Ponty. *Phénoménologie de la perception*. Gallimard, 1945.
- [MP53] Maurice Merleau-Ponty. *Le monde sensible et le monde de l'expression. Cours au Collège de France, Notes*. E. de Saint Aubert et S. Kristensen (éd.), Genève, MetisPresses, 1953.
- [MP64] Maurice Merleau-Ponty. *Le visible et l'invisible*. Gallimard, 1964.

- [MPEE04] Jean MacMillan, Michael Paley, Eileen Entin, and Elliot Entin. Questionnaires for distributed assessment of team mutual awareness. In Neville Anthony Stanton, Alan Hedge, Karel Brookhuis, Eduardo Salas, and Hal W. Hendrick, editors, *Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods*, chapter 51. CRC Press, 2004.
- [MPL⁺00] Wendy E. Mackay, Guillaume Pothier, Catherine Letondal, Kaare Bøegh, and Hans Erik Sørensen. Augmented reality : dangerous liaisons or the best of both worlds? In *Proceedings of DARE '2000*, 2000.
- [MPL⁺02] Wendy E. Mackay, Guillaume Pothier, Catherine Letondal, Kaare Bøegh, and Hans Erik Sørensen. The missing link : augmenting biology laboratory notebooks. In *Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology, Paris France*, pages 41 – 50. ACM Press, November 2002.
- [MV80] Humberto R. Maturana and Francesco J Varela. *Autopoiesis and Cognition : The Realization of the Living*. Dordrecht : Kluner Academic Publisher's Group, 1980.
- [MV92] Humberto R. Maturana and Francesco J Varela. *The Tree of Knowledge : The Biological Roots of Human Understanding*. Shambhala, 1992.
- [MZN18] Erin McAweeney, Haihua Zhang, and Michael Nebeling. User-driven design principles for gesture representations. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, page 547. ACM, 2018.
- [Naz19] Rémi Nazin. *Ergonomie théorique de l'humain-machine : quels fondements épistémologiques pour une conception sûre?* Theses, Université de Lorraine, January 2019.
- [NDK⁺05] C.L. Nehaniv, K. Dautenhahn, J. Kubacki, M. Haegele, C. Parlitz, and R. Alami. A methodological approach relating the classification of gesture to identification of human intent in the context of human-robot interaction. In *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication ROMAN 2005. Aug 2005, Nashville, United States*, pages 371–377, 2005.

- [Nev01] Maurice Nevile. *Beyond the black box : talk-in-interaction in the airline cockpit*. PhD thesis, Department of Linguistics, Australian National University, 2001.
- [NMM⁺09] B. Néron, H. Ménager, C. Maufrais, N. Joly, J. Maupetit, S. Letort, S. Carrere, P. Tuffery, and C. Letondal. Mobyte : a new full web bioinformatics framework. *Bioinformatics*, 25(22) :3005–3011, 2009.
- [Nor86] Donald A. Norman. *Cognitive engineering. User centered system design : New perspectives on human-computer interaction*. Lawrence Erlbaum Associates, 1986.
- [OAKB01] Vicki L. O’Day, Annette Adler, Allan Kuchinsky, and Anna Bouch. When worlds collide : Molecular biology as interdisciplinary collaboration. In *Proceedings of ECSCW’01*, pages 399–418, 2001.
- [OH12] Kees Overbeeke and Caroline Hummels. Industrial design. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2012.
- [OH16] Antti Oulasvirta and Kasper Hornbæk. HCI Research as Problem-Solving. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 4956–4967, 2016.
- [OJW⁺19] Thomas Olsson, Pradthana Jarusriboonchai, Pawel Wozniak, Susanna Paasovaara, Kaisa Väänänen, and Andrés Lucero. Technologies for enhancing collocated social interaction : Review of design solutions and approaches. *Computer Supported Cooperative Work*, 29 :1573–7551, 2019.
- [O’R05] Tim O’Reilly. *What is Web 2.0 : Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software*. O’Reilly Medias, 2005.
- [Par11] E. Paredis. Sustainability transitions and the nature of technology. *Foundations of Science*, 16 :195–225, 2011.
- [Pau19] Sylvain Pauchet. *From surface to surface -Transformations de surface tactile pour l’interaction incarnée dans le cockpit*. Theses, ISAE - Institut Supérieur de l’Aéronautique et de l’Espace, June 2019.

- [Pay90] Stephen J Payne. Looking HCI in the I. In *Proceedings of the IFIP TC13 Third International Conference on Human-Computer Interaction*, pages 185–191, 1990.
- [Pin21] Jaime Diaz Pineda. Relation Humain Système. In *Entretiens de Toulouse*, Toulouse, France, April 2021.
- [Pir84] Robert M. Pirsig. *Zen and the Art of Motorcycle Maintenance. An Inquiry into Values*. Bantam Book, 1984.
- [PJ15] Thomas Pederson and Shahram Jalaliniya. An egocentric approach towards ubiquitous multimodal interaction. In *Adjunct Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing and Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers (UbiComp/ISWC'15 Adjunct)*, pages 927–932, New York, NY, USA, 2015. Association for Computing Machinery.
- [PLV⁺18] Sylvain Pauchet, Catherine Letondal, Jean-Luc Vinot, Mickaël Causse, Mathieu Cousy, Valentin Becquet, and Guillaume Crouzet. GazeForm : Dynamic Gaze-adaptive Touch Surface for Eyes-free Interaction in Airliner Cockpits. In *Proceedings of DIS '18, Designing Interactive Systems Conference*, pages P.1193–1205 ; ISBN : 978–1–4503–5198–0, Hong-Kong, China, June 2018. ACM.
- [Pro21] Shift Project. Crise(s), climat : préparer l’avenir de l’aviation : les propositions du shift, 2021. <https://theshiftproject.org/article/climat-preparer-avenir-aviation-propositions-shift-contreparties/>.
- [PVL⁺19] Sylvain Pauchet, Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Alexandre Lemort, Claire Lavenir, Timothée Lecomte, Stéphanie Rey, Valentin Becquet, and Guillaume Crouzet. Multi-plié : a Linear Foldable and Flattenable Interactive Display to Support Efficiency, Safety and Collaboration. In *Proceedings of CHI 2019, ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Glasgow, United Kingdom, May 2019.
- [Ram99] W. Rammert. Relations that constitute technology and media that make a difference : toward a social pragmatic theory of technicization. *Techne : Journal of the Society for Philosophy and Technology*, 4(3), 1999. <https://scholar.lib.vt.edu/ejournals/SPT/v4n3/RAMMERT.html>.

- [Ray18] Camille Raymond. *Extension des modèles d'ingénierie système à l'analyse du domaine de travail*. Theses, Université Paul Sabatier (Toulouse 3), June 2018.
- [RCP⁺16] Simon Robinson, Céline Coutrix, Jennifer Pearson, Juan Rosso, Matheus Fernandes Torquato, Laurence Nigay, and Matt Jones. Emergeables : Deformable Displays for Continuous Eyes-Free Mobile Interaction. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3793–3805, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [RD02] Madhu C. Reddy and P. Dourish. A finger on the pulse : temporal rhythms and information seeking in medical work. In *Proceedings of CSCW '02*, 2002.
- [Ret94] Marc Rettig. Prototyping for tiny fingers. *Commun. ACM*, 37(4) :21–27, April 1994.
- [Reu76] Franz Reuleaux. *The Kinematics of Machinery : Outlines of a Theory of Machines*. Macmillan, London, 1876.
- [Rib11] Patricia Ribault. Du toucher au geste technique : la « technè des corps ». *Appareil*, 8, 2011.
- [Riv19] Guillaume Rivière. L'Interaction Homme-Machine contre le changement climatique : retour sur une controverse. Édité par Pr. J.M.C. Bastien (Université de Lorraine) & Pr. G. Calvary (Univ. Grenoble Alpes), December 2019.
- [Rog04] Yvonne Rogers. New theoretical approaches for HCI. *Annual Review of Information Science and Technology*, 38 :87–143, 2004.
- [Rog12] Yvonne Rogers. HCI theory : classical, modern, and contemporary. *Synthesis lectures on human-centered informatics*, 5(2) :1–129, 2012.
- [Ros18] Jean-Yves Rossignol. *Complexité. Fondamentaux à l'usage des étudiants et des professionnels*. EDP Sciences, 2018.
- [Rou12] Jeanne-Marie Roux. Le toucher, entre objets et objectivité. *Implications philosophiques*, 2012, fev 2012. <http://www.implications-philosophiques.org/langage-et-esthetique/implications-de-la-perception/le-toucher-entre->

- objets-et-ob-jectivite-i/ et <http://www.implications-philosophiques.org/langage-et-esthetique/implications-de-la-perception/le-toucher-entre-objets-et-ob-jectivite-ii-2/>.
- [RPC16] Camille Raymond, Daniel Prun, and Julien Cegarra. Associer l'ingénierie système et le Cognitive Work Analysis pour soutenir l'intégration Homme-Système. In *Proceedings of Ergo'IA 2016*, Créativité et innovation responsable pour l'industrie du futur : comment le Design, l'Ergonomie et l'IHM répondront aux challenges de demain ?, Bidart, France, July 2016.
- [RS91] B. Rime and L Schiaratura. *Gesture and Speech. Fundamentals of Nonverbal Behavior*. Feldman & Rime, 1991.
- [RV15] Robert Rosenberger and Peter P.C.C. Verbeek. *A field guide to postphenomenology*, pages 9–41. Postphenomenology and the Philosophy of Technology. Lexington Books, 2015.
- [Rég06a] Irénée Régnauld. Episode II : rendre visible l'invisible, September 2006. <https://maisouvaleweb.fr/internet-doit-il-disparaitre-episode-ii-rendre-visible-linvisible/>, dernier accès en juillet 2021.
- [Rég06b] Irénée Régnauld. Internet doit-il disparaître? Episode I : pile et face, September 2006. <https://maisouvaleweb.fr/internet-doit-il-disparaitre-episode-i-pile-et-face/>, dernier accès en juillet 2021.
- [Saf10] FAA Action Plan 15 Safety. Human Performance in Air Traffic Management Safety. Technical report, EUROCONTROL, September 2010. <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/1404.pdf>.
- [Sch84] Donald A. Schön. *The Reflective Practitioner. How Professionals Think In Action*. Basic Books; 1st edition (September 23, 1984), 1984.
- [Sch96] Michael Schrage. Cultures of prototyping. In *Bringing Design to Software*, pages 191–213, New York, NY, USA, 1996. Association for Computing Machinery.
- [Sch98] Kjeld Schmidt. Some notes on mutual awareness. Technical report, COTCOS, CTI, DTU, Copenhagen, Denmark, 1998.

- [Sch02] Kjeld Schmidt. The problem with 'awareness' : Introductory remarks on 'awareness in cscw'. *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 11(3-4) :285–298, 2002.
- [SG17] Pieter Jan Stappers and Elisa Giaccardi. Research through design. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2017.
- [SH97] Abigail Sellen and Richard Harper. Paper as an analytic resource for the design of new technologies. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, pages 319–326, 1997.
- [SH02] Abigail J. Sellen and Richard H. R. Harper. *The Myth of the Paperless Office*. Cambridge, MA : MIT Press, 2002, 2002.
- [SH10] Orit Shaer and Eva Hornecker. Tangible user interfaces : Past, present, and future directions. *Found. Trends Hum.-Comput. Interact.*, 3(1-2) :1–137, January 2010.
- [SHL⁺13] C. Savery, C. Hurter, R. Lesbordes, M. Cordeil, and N. Graham. When paper meets multi-touch : a study of multi-modal interactions in air traffic controls. In *Proceedings of INTERACT 2013, 14th IFIP-TC13 International Conference on Human-Computer Interaction , Sep 2013, Cape Town, South Africa*. Springer, 2013.
- [Sim42] Jules Simon. Essais de philosophie : par M. Charles de Rémusat. *Revue des Deux Mondes (1829-1971)*, 30(3) :420–442, 1842.
- [Sim58] Gilbert Simondon. *Du mode d'existence des objets techniques*. Aubier-Montaigne, 1958.
- [Sim05] Gilbert Simondon. *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*. J.Millon, 2005.
- [Sim08] Gilbert Simondon. *Imagination et invention, 1965-1966*. Editions de la Transparence, 2008.
- [Sim14a] Gilbert Simondon. La mentalité technique. In *Sur la technique (1953-1983)*. PUF, Paris, 2014.
- [Sim14b] Gilbert Simondon. Les limites du progrès humain. In *Sur la technique (1953-1983)*. PUF, Paris, 2014.

- [Sim14c] Gilbert Simondon. Psycho-sociologie de la technicité. In *Sur la technique (1953-1983)*. PUF, Paris, 2014.
- [Sim14d] Gilbert Simondon. Réflexions sur la techno-esthétique. In *Sur la technique (1953-1983)*. PUF, Paris, 2014.
- [Sim14e] Gilbert Simondon. *Sur la technique (1953-1983)*. PUF, Paris, 2014.
- [SKB⁺19] Norman Makoto Su, Victor Kaptelinin, Jeffrey Bardzell, Shao-wen Bardzell, Jed R. Brubaker, Ann Light, and Dag Svanaes. Standing on the Shoulders of Giants : Exploring the Intersection of Philosophy and HCI. In *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI EA '19*, pages 1–8, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [SKM04] T. Schnell, Y. Kwon, and S. Merchant. Improved flight technical performance in flight decks equipped with synthetic vision information system displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 14 :79–102, 2004.
- [SM10] E. Salas and D. E. Maurino. *Human factors in aviation*. Academic Press/Elsevier, 2010.
- [Spé72] Jean-Claude Spérandio. *Charge de travail et variations des modes opératoires*. Theses, Université Paris Descartes, 1972. sous la direction de Gilbert Simondon.
- [SS20] Daniela Schmid and Neville A. Stanton. Progressing toward airliners' reduced-crew operations : A systematic literature review. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 30(1-2) :1–24, 2020.
- [SSW⁺17] Neville A. Stanton, Paul M. Salmon, Guy H. Walker, Eduardo Salas, and Peter A. Hancock. State-of-science : situation awareness in individuals, teams and systems. *Ergonomics*, 60(4) :449–466, 2017.
- [Sti94] Bernard Stiegler. *La technique et le temps*. Galilée, 1994.
- [Sti16] Bernard Stiegler. Dans le cycle des images - cercle ou spirale? imagination, invention et transindividuation. In *Gilbert Simondon et l'Invention du futur, Actes de la décade des 5-15 août 2013 du Centre culturel international de Cerisy-la-Salle*, pages 271–289. Klincksieck, 2016.

- [Str88] Avrum Stroll. *Surfaces*. Univ Of Minnesota Press; First edition., 1988.
- [Sté15] Vial Stéphane. Qu'est-ce que la recherche en design ? introduction aux sciences du design. *Sciences du Design*, 1(1) :22–36, 2015. <https://www.cairn.info/revue-sciences-du-design-2015-1-page-22.htm>.
- [Suc87] Lucy A. Suchman. *Plans and Situated Actions : The Problem of Human-Machine Communication*. Cambridge University Press, USA, 1987.
- [Sva13a] Dag Svanæs. Interaction Design for and with the Lived Body : Some Implications of Merleau-Ponty's Phenomenology. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, 20(1), April 2013.
- [Sva13b] Dag Svanæs. Philosophy of interaction. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2013.
- [SVC04] Céline Schlienger, Stéphane Valès, and Stéphane Chatty. Une expérience de conception et de prototypage d'interfaces évoluées en milieu industriel. In *Proceedings of the 16th Conference on l'Interaction Homme-Machine, IHM '04*, pages 165–172, New York, NY, USA, 2004. Association for Computing Machinery.
- [SW10] Erik Stolterman and Mikael Wiberg. Concept-driven interaction design research. *Human-Computer Interaction*, 25(2) :95–118, 2010.
- [Tay15] Alex Taylor. After Interaction. *Interactions*, 22(5) :48–53, August 2015.
- [Tho12] James Thomson. *Collected papers in physics and engineering*. Cambridge University Press, ed Joseph Larmor and James Thomson, 1912.
- [TLM09] Theophanis Tsandilas, Catherine Letondal, and Wendy Mackay. Musink : Composing Music through Augmented Drawing. In *Proceedings of the International conference on Human factors in computing systems, CHI 2019*, pages 819–828, Boston, United States, April 2009.
- [Tra12] Noam Tractinsky. Visual Aesthetics. *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.*, 2012.

- [UI00] B. Ullmer and H. Ishii. Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Systems Journal*, 39(3-4) :915–931, 2000.
- [VA12] Jean-Luc Vinot and Sylvie Athènes. Legible, are you sure? An experimentation-based typographical design in safety-critical context. In *CHI 2012, ACM conference on Human Factors in Computing Systems*, pages pp 2287–2296, Austin, United States, May 2012.
- [VC06] Jean Vanderdonckt and Adrien Coyette. Vers un prototypage des interfaces graphiques incluant vraiment l'utilisateur final. In *Proceedings of 10ième Colloque Int. sur l'Ergonomie et l'Informatique Avancée ERGO-IA'2006 (Biarritz, 11-13 October 2006).*, October 2006.
- [vDDC⁺13] van Dijk, Moussette D., Kuenen C., S., and C Hummels. Radical clashes : what tangible interaction is made of. In *Proc. of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '13)*. ACM, New York, NY, USA, 323-326., 2013.
- [vdHM11] Elise van den Hoven and Ali Mazalek. Grasping gestures : Gesturing with physical artifacts. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 25(3) :255–271, 2011.
- [Ver05] Peter-Paul Verbeek. *What Things Do. Philosophical Reflections on Technology, Agency, and Design*. Penn State University Press, 2005.
- [Ver15] Peter-Paul Verbeek. Beyond Interaction : A Short Introduction to Mediation Theory. *Interactions*, May-June 2015.
- [Via15] Diego Viana. Individuation and the synthesized network : An approach to digital convergence. *Platform : Journal of Media and Communication*, 6(1) :34–45, April 2015. <https://platformjmc.com/2015/04/27/vol-6>.
- [Vic95] K.J. Vicente. A few implications of an ecological approach to human factors. In J. Carid & K. J. Vicente J. Flach, P. Hancock, editor, *Global perspective on the ecology of human-machine systems*, pages 54–67. Hillsdale, NJ :L. Erlbaum, 1995.
- [Vin14] Jean-Luc Vinot. *Apports d'un concept de continuité pour l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes in-*

- teractifs complexes*. Theses, Université Toulouse III - Paul Sabatier, November 2014.
- [VK97] Peter P.C.C. Verbeek and P.J.H. Kockelkoren. *Matter Matters*, pages 101–119. OIO Publishers, 1997.
- [VLL⁺14] Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Rémi Lesbordes, Stéphane Chatty, Stéphane Conversy, and Christophe Hurter. Tangible Augmented Reality for Air Traffic Control. *Interactions*, 21(4) :54–57, July 2014.
- [VLPC16] Jean-Luc Vinot, Catherine Letondal, Sylvain Pauchet, and Stéphane Chatty. Could tangibility improve the safety of touch-based Interaction? In *HCI-Aero 2016, International Conference on Human-Computer Interaction in Aerospace*, Paris, France, September 2016. ACM.
- [VR90] K.J. Vicente and J. Rasmussen. The ecology of man-machine systems 11 : Mediating "direct perception" in complex work domains. *Ecological Psychology*, 2 :207–249, 1990.
- [WG15] C. A. Wolter and B. F. Gore. A validated task analysis of the single pilot operations concept. Technical report, Moffett Field, CA NASA Ames Research Center, 2015. NASA TM-2015-218480.
- [Wib17] Mikael Wiberg. *The materiality of interaction. Notes on the materials of interaction design*. MIT Press, 2017.
- [Wil14] Heather Wiltse. Unpacking Digital Material Mediation. *Techné : Research in Philosophy and Technology*, 18(3) :154–182, 2014.
- [WMW09] Jacob O. Wobbrock, Meredith Ringel Morris, and Andrew D. Wilson. User-defined gestures for surface computing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1083–1092. ACM, 2009.
- [WSR15] Heather Wiltse, Erik Stolterman, and Johan Redström. Wicked Interactions (On the Necessity of) Reframing the "Computer" in Philosophy and Design. *Techné : Research in Philosophy and Technology*, 19(1) :26–49, 2015.
- [WYAL19] Danding Wang, Qian Yang, Ashraf Abdul, and Brian Y. Lim. Designing Theory-Driven User-Centric Explainable AI. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in*

- Computing Systems*, page 1?15, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [Yat18] Arlette Yatchinovsky. *L'approche systémique. Pour gérer l'incertitude et la complexité*. ESF sciences humaines, 2018.
- [ZD13] Bin Zhang and Hua Dong. User-Mobile Phone Interactions : A Postphenomenology Analysis. In Aaron Marcus, editor, *Design, User Experience, and Usability. Design Philosophy, Methods, and Tools*, pages 171–180, Berlin, Heidelberg, 2013. Springer Berlin Heidelberg.
- [Zim09] John Zimmerman. Designing for the Self : Making Products That Help People Become the Person They Desire to Be. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 395–404, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [ZJDLD09] G. Zufferey, P. Jermann, D. Do-Lenh, and P. Dillenbourg. Using augmentations as bridges from concrete to abstract representations. In *Proceedings of BCS-HCI '09, UK*. ACM, 2009.