



Apports d'un concept de continuité pour l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes interactifs complexes

Jean-Luc Vinot

► To cite this version:

Jean-Luc Vinot. Apports d'un concept de continuité pour l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes interactifs complexes. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2014. Français. NNT : . tel-01117763

HAL Id: tel-01117763

<https://theses.hal.science/tel-01117763>

Submitted on 17 Feb 2015

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du

Doctorat de l'Université de Toulouse

Délivré par l'Université Toulouse III - Paul Sabatier
Discipline ou spécialité : Image, Information, Hypermédia

Présentée et soutenue par Jean-Luc VINOT

Le 17 novembre 2014

Titre : *Apports d'un concept de continuité pour l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes interactifs complexes.*

JURY

M. Philippe Palanque, Président
Mme Wendy Mackay, Rapporteur
M. Géry Casiez, Rapporteur
M. Denis Bonnet, Examineur
M. Stéphane Chatty, Examineur
M. Stéphane Conversy, Directeur de thèse

École doctorale : MITT

Mathématiques, Informatique et Télécommunications de Toulouse

Unité de recherche : UMR 5505 IRIT
Institut de Recherche en Informatique de Toulouse

Directeur de Thèse : Stéphane Conversy

VINOT J.L. (2014).

Apports d'un concept de continuité pour l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes interactifs complexes.

Thèse de Doctorat en Informatique, Université de TOULOUSE III - Paul Sabatier.

Remerciements

À l'issue de ce travail de thèse je voudrais remercier toutes celles et tous ceux qui ont contribué à le rendre possible.

Tout d'abord, mon Directeur de Thèse Stéphane Conversy, pour avoir dirigé ce travail de recherche d'un doctorant quelque peu « atypique », avec ses conseils, sa patience, et une constante exigence.

Je remercie très respectueusement l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'assumer cette charge. Tout particulièrement Wendy Mackay, Directrice de Recherche INRIA Saclay, et Géry Casiez, Professeur de l'Université Lille 1, qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail, mais aussi Denis Bonnet, Directeur de l'Innovation chez Thales.

Philippe Palanque, Professeur de l'Université Toulouse 3 et Président de ce jury de Thèse, qui m'a accueilli dans son équipe et a aidé le démarrage de cette thèse. Avec lui, je voudrais aussi remercier les membres des équipes ICS et ELIPSE de l'IRIT, et plus largement, tous les chercheurs de l'interaction homme-machine dont les rencontres pendant ces quinze dernières années ont éclairé mes propres recherches.

Stéphane Chatty, Responsable du Laboratoire d'Informatique Interactive de l'ENAC et mes collègues du Laboratoire, Hélène, Catherine, les Mathieu(s), Christophe, Nicolas, Yannick, Jean-Paul, Sébastien, Daniel... pour tous ces partages qui ont permis l'avancement de cette réflexion ; sans oublier  ric, Sylvie, Rémi, Gwena l, Robert, François... compagnons de route PII du CENA puis de la DSNA/DTI.

Enfin, je ne remercierai jamais assez ma femme, Isabelle, qui m'a soutenu pendant ces quatre années, supportant les « effets de bord » de cette élaboration, mais aussi contribuant à ce travail de recherche et au questionnement du concept de continuité.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	25
1. INTRODUCTION	29
Continuité : émergence d'un concept au service de l'architecture graphique des interfaces humain-système	
1.1. Définitions	31
1.2. Principes, concepts ou propriétés de continuité : emprunts à différents champs disciplinaires.....	34
1.2.1. Concept de continuité en Mathématiques et en physique	35
1.2.1.1. Mathématiques : fonctions continues.....	35
1.2.1.2. Physique : discontinuité de la matière et de l'énergie ?.....	36
1.2.2. Concepts de continuité en psychologie.....	37
1.2.2.1. Continuité de perception, d'action et de déplacement : une approche écologique	37
1.2.2.2. Psychologie de la forme et loi de continuité.....	39
1.2.2.3. Continuité perceptuelle : une image mentale partielle de l'environnement.....	40
1.2.3. Contraste et Harmonie, principes de continuité dans les Arts graphiques.....	42
1.2.3.1. Continuité dans les représentations graphiques.....	42
1.2.3.2. Contraste et Harmonie : un double principe clef des Arts et de la création plastique	44
1.2.3.3. Continuité visuelle, continuité de sens	46
1.2.3.4. Composition graphique et continuité de lecture	47
1.2.4. Motion design et continuité temporelle.....	48
1.2.4.1. Représentation visuelle statique et perception continue du temps	48
1.2.4.2. Image animée et animations graphiques	49
1.2.4.3. Motion Graphics Design.....	51
1.2.5. Formes et espaces : Principes de continuité en Architecture et Urbanisme	51
1.2.5.1. Dispositif spatial et continuité d'accès des espaces architecturaux.....	51
1.2.5.2. Harmonie de composition et continuité d'usage des espaces architecturaux.....	52

1.2.5.3.	Continuité modèle-programme : du modèle formel à la construction de l'édifice	53
1.2.5.4.	Continuité de représentation des espaces urbains.....	54
1.2.5.5.	Continuité forme-contexte de l'architecture adaptative	55
1.2.6.	Synthèse et principes de continuité et de discontinuité.....	56
1.3.	Continuité et discontinuité dans les systèmes interactifs : élaboration d'un concept	57
1.3.1.	Questionnements	57
1.3.2.	Définition d'une problématique de recherche	58
1.3.2.1.	Une problématique pour l'interaction homme-machine	58
1.3.2.2.	Un processus de recherche	59
1.3.2.3.	Des apports attendus	59
1.4.	Trois explorations du concept de continuité pour les systèmes interactifs	60
1.4.1.	Exploration 1 : élaborer un système de formes favorisant la lisibilité comme matériau graphique pour l'interface	61
1.4.2.	Exploration 2 : penser la cohérence et la continuité des espaces interactifs mixtes entre physique et numérique	61
1.4.3.	Exploration 3 : promouvoir le concept de continuité pour revisiter l'architecture graphique de l'interface des systèmes interactifs complexes.....	62

2. DEUXIEME PARTIE 67

Aeronautical Fonts: concept de continuité et design de composants textuels adaptés aux contextes critiques

2.1.	Contexte industriel et de recherche.....	69
2.1.1.	Contexte du projet et objectifs industriels.....	69
2.1.2.	Contexte de recherche et implication.....	70
2.2.	Analyse initiale	70
2.2.1.	Analyse des besoins et de l'existant technique	71
2.2.1.1.	Analyse de l'activité et des besoins	71
2.2.1.1.1.	Cockpit : activités multiples et interfaces complexes	71
2.2.1.1.2.	Observation de l'activité des équipages commerciaux.....	71
2.2.1.1.3.	Un contexte d'usage et des besoins très spécifiques.....	72
2.2.1.1.4.	Identification des besoins pour le design typographique	73

2.2.1.2.	Analyse technique de l'existant.....	75
2.2.1.2.1.	Interfaces du cockpit et types de représentation.....	75
2.2.1.2.2.	Architecture des plans d'affichage du cockpit	77
2.2.1.2.3.	Fontes CDS : gabarit, forme des lettres et discrimination visuelle.....	79
2.2.2.	États de l'art lisibilité.....	81
2.2.2.1.	Traitement perceptif de l'information visuelle textuelle affichée sur écran.....	81
2.2.2.1.1.	Saccades et fixations oculaires	82
2.2.2.1.2.	Processus de lecture et identification des caractères	83
2.2.2.1.3.	Perception visuelle et fréquences spatiales	84
2.2.2.2.	Principes et moyens typographiques de la lisibilité.....	85
2.2.2.2.1.	Primitives typographiques : structurer la lisibilité de la lettre	86
2.2.2.2.2.	Régularités typographiques : garantir la continuité de lecture	88
2.2.2.2.3.	Corrections optiques.....	89
2.2.2.2.4.	Invariants typographiques : ajuster les propriétés graphiques	89
2.2.2.2.5.	Lisibilité des typographies numériques.....	90
2.2.3.	Des exigences aux principes de design.....	92
2.2.3.1.	Exigences.....	93
2.2.3.2.	principes de design.....	93
2.2.3.3.	Une phase de conception basée sur l'expérimentation.....	94
2.3.	TypoAero : conception typographique et mise en œuvre du principe de continuité	94
2.3.1.	Exploration des solutions.....	95
2.3.1.1.	Anatomie comparée de polices de caractères lisibles.....	95
2.3.1.2.	Augmenter la discrimination en vision basse fréquences.....	98
2.3.1.2.1.	Améliorer la prédiction en vision périphérique.....	98
2.3.1.2.2.	Effets visuels de l'application d'un flou gaussien	98
2.3.1.3.	Discontinuité graphique : un concept de design pour garantir la lecture en contexte dégradé	99
2.3.1.3.1.	Un besoin graphique de discontinuité visuelle.....	99
2.3.1.3.2.	Le principe de l'utilisation d'incises pour discriminer la forme.....	100
2.3.1.3.3.	Augmenter la discontinuité des rendus visuels.....	101
2.3.1.4.	Organiser la régularité typographique pour favoriser la continuité de lecture	101
2.3.1.4.1.	Moyens typographiques de la continuité : orientation d'outil et régularité de tracé.....	101
2.3.1.4.2.	Structure visuelle continue : définition des alignements.....	102
2.3.2.	Premières créations typographiques d'une fonte TypoAero.....	103

2.3.2.1.	Études typographiques : principes de forme et style	103
2.3.2.2.	Mise en forme vectorielle	104
2.3.2.3.	Premier prototype logiciel.....	104
2.3.2.4.	Réalisation des glyphes de test.....	105
2.3.3.	Un processus de design centré expérimentation	105
2.3.3.1.	Expérimentation 1 : évaluer la lisibilité-discrimination.....	106
2.3.3.1.1.	Dispositif et protocole expérimental.....	106
2.3.3.1.2.	Résultats expérimentaux.....	109
2.3.3.2.	Matrices de confusion : mesurer la discontinuité.....	110
2.3.3.2.1.	Réalisation des matrices de confusion.....	110
2.3.3.2.2.	Analyse des distributions et métriques de confusion.....	111
2.3.3.2.3.	Augmenter la discontinuité : enseignements pour itérer le design	112
2.3.3.3.	Expérimentation 2 : espace continu de paramétrage des propriétés.....	113
2.3.3.3.1.	Protocole expérimental	113
2.3.3.3.2.	Résultats expérimentaux.....	114
2.3.3.4.	Identifier des valeurs continues de paramétrage	115
2.3.3.5.	Expérimentation 3 : évaluer la continuité et le confort de lecture.....	116
2.3.3.5.1.	Méthodologie et protocoles	116
2.3.3.5.2.	Résultats des tests de comparaison par paires	118
2.3.3.5.3.	Résultats qualitatifs des interviews et questionnaire	119
2.4.	De TypoAero à AI-B612 : production d'un composant logiciel pour l'industrie aéronautique	120
2.4.1.	Développement et validation	120
2.4.2.	Livraison : une famille de 8 fontes numériques.....	121
2.4.2.1.	Fontes AI-B612 à espacement proportionnel	121
2.4.2.2.	Fontes AI-B612 monospace	121
2.4.2.3.	Jeux de caractères.....	122
2.5.	Conclusion et perspectives	123
2.5.1.	Travail réalisé	123
2.5.1.1.	Objectifs industriels et valorisation	123
2.5.1.2.	Résultats de recherche	123
2.5.1.2.1.	Conception typographique pour l'IHM	123
2.5.1.2.2.	Apports du concept de continuité.....	124
2.5.1.3.	Perspectives.....	124

3. TROISIEME PARTIE	129
<i>Strip'TIC : explorer la continuité des espaces interactifs entre mondes physique et numérique.</i>	
3.1. De l'architecture hybride à l'interaction tangible : continuité de l'espace physique et numérique.....	129
3.1.1. Continuité architecturale et urbaine	129
3.1.1.1. Espaces à perception continue	129
3.1.1.2. Espaces à perception fragmentée.....	130
3.1.1.3. Espaces architecturaux sensibles et continuité physique-virtuel	131
3.1.2. Continuité des espaces interactifs entre mondes physique et numérique.....	132
3.2. Un espace interactif tangible basé sur le strip papier	133
3.2.1. Contexte de recherche	133
3.2.2. Contexte d'activité : contrôle aérien d'approche et stripping.....	134
3.2.2.1. Le contrôle aérien en France	134
3.2.2.2. Évolution des interfaces contrôleurs : strips papier, électroniques ou stripless.....	137
3.2.2.2.1. Du strip papier au « stripless »	137
3.2.2.2.2. Premiers strips papier augmentés : <i>Caméléon</i>	138
3.2.2.2.3. Strips électroniques : De <i>DigiStrips</i> à <i>SmartStrips</i>	138
3.2.2.2.4. <i>DigiStrips</i> : Continuité gestuelle, spatiale et visuelle.....	139
3.2.2.2.5. <i>ASTER</i> : transition continue entre vue « radar » et vue « tableau »	141
3.2.2.2.6. <i>MAMMI</i> : travail coopératif et continuité temporelle.....	142
3.2.3. <i>Strip'TIC</i> : une plateforme d'interaction mixte pour l'ATC	143
3.2.3.1. Description du dispositif interactif de <i>Strip'TIC</i>	144
3.2.3.2. Observations des contrôleurs aériens et ateliers participatifs.....	146
3.2.3.2.1. Séances d'observations des contrôleurs en contexte opérationnel.....	146
3.2.3.3. Ateliers participatifs.....	148
3.3. Cohérence et continuité de l'espace interactif entre physique et numérique	149
3.3.1. Cohérence de l'interaction et continuité entre surfaces.....	149
3.3.1.1. Un espace continu d'interaction multi-surfaces.....	149
3.3.1.2. Exemple 1 : cohérence de l'interaction entre surfaces et filtrage de vols	151
3.3.1.3. Exemple 2 : continuité objet-substrat et extension du strip	152

3.3.2.	Continuité physique-numérique de l'interface : un <i>Window Manager tangible</i>	153
3.3.2.1.	Un concept de Window Manager Tangible ?.....	154
3.3.2.1.1.	les fonctions du Window Manager	154
3.3.2.1.2.	Étendre le concept de Window Manager au tangible	156
3.3.2.2.	Fenêtres numériques en papier et gestion des vues	156
3.3.2.3.	Gestion des événements et transformation des coordonnées des objets physiques.....	157
3.3.2.4.	Rendu graphique sur l'interface physique et continuité « plastique » de l'interface	159
3.3.3.	Interactions continues entre physique et numérique.....	159
3.3.3.1.	Exemple 3 : continuité d'usage entre strip papier et strip virtuel.....	159
3.3.3.2.	Exemple 4 : calcul tangible des heures de sortie de stacks.....	161
3.4.	Continuité perceptuelle et cognitive, continuité temporelle et programmation de l'action	163
3.4.1.	Continuité perceptuelle des composants de représentations : substrat et impressions physiques et lumineuses du strip	163
3.4.1.1.	Une impression mixte multicouches.....	164
3.4.1.2.	Continuité visuelle et dimensions perceptuelles des matériaux et des impressions.....	165
3.4.1.2.1.	Continuité perceptive	165
3.4.1.2.2.	Modalités de mélange optique réel-virtuel	166
3.4.1.2.3.	Dimensions perceptuelles des matériaux et des impressions	167
3.4.2.	Continuité de l'activité : encodage et programmation de l'action	170
3.4.2.1.	Encodage temporel de l'espace de travail.....	170
3.4.2.2.	Programmation de l'action.....	171
3.4.2.3.	Exemple 5 : timer de turbulence de sillage.....	172
3.4.3.	Continuité physique-numérique et capacités d'externalisations cognitives.....	173
3.4.3.1.	Externalisation des fonctions cognitives	173
3.4.3.2.	Continuité physique-numérique : la « révolution cognitive »	174
3.4.3.3.	Discontinuité entre externalisations cognitives : des alarmes implicites	174
3.4.3.4.	Exemple 6 : utilisation de strips virtuels isolés	175
3.5.	Continuité interactive entre surface et espace	176
3.5.1.	Continuité interactive entre contact de surface et espace 3D.....	177
3.5.2.	Continuité physique-numérique par l'interaction gestuelle	177

3.6. Conclusion et perspectives	179
3.6.1. Travail réalisé	179
3.6.1.1. Identification des aspects collectifs et personnels de la recherche.....	179
3.6.1.2. Synthèse et apports au concept de continuité.....	179
3.6.2. Perspectives	181
4. QUATRIEME PARTIE	185
<i>Continuous GUI : apports du concept de continuité pour architecturer l'interface graphique utilisateur des systèmes complexes.</i>	
4.1. Architecture graphique des interfaces : des choix impactant la continuité visuelle et d'usage ?	186
4.1.1. Principes graphiques de l'interface utilisateur.....	186
4.1.1.1. Vitalité du paradigme WIMP	186
4.1.1.2. Principe de séparation et cloisonnement des activités.....	187
4.1.2. GUI, des problèmes de continuités.....	188
4.1.2.1. Segmentations graphiques et problèmes de continuité	188
4.1.2.2. Hétérogénéité spatiale et de représentation et problèmes de continuité graphique.....	191
4.1.2.3. Opacité des structures et problèmes de continuité interactive.....	194
4.2. État de l'art : apports pour un concept de continuité	196
4.2.1. Apports de travaux IHM que nous associons au concept de continuité	196
4.2.1.1. Continuité architecturale et plasticité de l'espace interactif	196
4.2.1.1.1. 2D+ : nouvelles géométries pour l'interface graphique.....	196
4.2.1.1.2. Composition de structures graphiques interactives.....	197
4.2.1.2. Par-delà la segmentation logicielle : construire de la continuité d'usage.....	198
4.2.1.2.1. Association de fenêtres et connexions entre applications.....	198
4.2.1.2.2. Mécanismes de navigation et continuités d'interaction et d'usage.....	199
4.2.1.2.3. Annotations libres ou « dissolution des fenêtres ».....	200
4.2.1.2.4. Repenser l'espace	201
4.2.1.3. Continuités des visualisations et des représentations	201
4.2.1.3.1. Techniques de visualisations et représentations continues	201
4.2.1.3.2. Continuités graphiques et interactives et transitions visuelles.....	202
4.2.1.3.3. Continuité visuelle et lecture des informations	203

4.2.1.3.4.	Continuité d'accès visuel aux contenus et continuité de représentation des informations temporelles	204
4.2.1.3.5.	Abstraction, adaptation, variations visuelles	206
4.2.2.	Apports externes à l'IHM : interroger la continuité perceptuelle et structurelle des formes et des espaces	206
4.2.2.1.	Espace et formes, heurts et obstacles	207
4.2.2.2.	Limites et passages dans les espaces architecturaux	208
4.2.2.3.	Forme et déformation des objets architecturaux	210
4.3.	Continuous GUI : définition d'une problématique	212
4.3.1.	Expression de besoins pour la continuité	212
4.3.1.1.	Systèmes interactifs critiques et interfaces complexes du cockpit	212
4.3.1.1.1.	Évolution des interfaces du cockpit	212
4.3.1.1.2.	Nouveaux concepts IHM, nouveaux besoins graphiques	214
4.3.1.2.	Systèmes grand public : surface d'affichage restreinte et activités complexes	215
4.3.1.2.1.	Diversité des dispositifs, complexité graphique et limitations de l'affichage	215
4.3.1.2.2.	Recueil de besoins : gestion de l'affichage en contexte multi-applications	216
4.3.1.2.3.	Observations des utilisateurs	218
4.3.1.3.	Configuration graphique des interfaces par les utilisateurs	220
4.3.1.3.1.	Interfaces du cockpit : un système d'affichage verrouillé	220
4.3.1.3.2.	Interfaces grands-publics : une personnalisation limitée	221
4.3.2.	Continuous GUI: ouvrir l'espace perceptuel et d'interaction de l'interface graphique	221
4.3.2.1.	Explorer la conception d'espaces interactifs continus	222
4.3.2.2.	Principes pour un Design de la continuité dans les GUI	222
4.3.2.3.	Augmenter l'adaptativité graphique pour les utilisateurs et pour les concepteurs	224
4.4.	Exploration de design de la continuité pour les GUI	225
4.4.1.	Idéations	225
4.4.1.1.	Ateliers habitats interactifs, phase 2	225
4.4.1.2.	Roughs d'exploration du concept de continuité	227
4.4.1.2.1.	Surface continue d'interaction pour le cockpit	227
4.4.1.2.2.	Interface graphique multi-plans	228
4.4.1.2.3.	Generalized scrolling view spaces	229
4.4.1.2.4.	Crossing Digital Places	229
4.4.1.2.5.	Crossing windows boundaries	230
4.4.1.2.6.	Porous Graphical Structures	231

4.5. Implémenter la continuité dans les interfaces graphiques	231
4.5.1.1. Espace graphique et interactif continu pour le cockpit	232
Scénario 1 : « creative fly deck »	232
4.5.1.2. Représentation adaptative pour une interface multi drones	234
4.5.1.3. « Rapprocher » l'objet pour garantir l'accès	234
Scénario 2 : « Embedded keyboard »	235
4.5.1.4. Augmenter les limites pour favoriser l'accès aux ressources	236
Scénario 3 : « Augmented Boundaries »	237
4.5.1.5. Construire des passages par-delà les frontières applicatives	239
Scénario 4 : « Windows Transitions »	239
Maquettage non fonctionnel	240
Prototypage fonctionnel : première itération	241
Prototypage fonctionnel : deuxième itération	242
4.6. Conclusion et perspectives.....	244
4.6.1. Rappel des objectifs.....	244
4.6.2. Travail réalisé et apports au concept de continuité.....	244
4.6.2.1. Analyse initiale	244
4.6.2.2. Synthèse des explorations de design	245
4.6.3. Perspectives	245
 CONCLUSION GÉNÉRALE	 249
 Bibliographie générale	 253
Glossaire aéronautique	269
Glossaire typographique	271

TABLE DES FIGURES

Figure 1 :	Extrait d'une page du Gaffiot - www.lexilogos.com/latin/gaffiot.php	31
Figure 2 :	Définitions du mot continuité, (à gauche) page lexicale du terme sur le portail du CNRTL (CNRS), (à droite) définition du mot continuité sur la version électronique du dictionnaire Le Littré de la langue française	32
Figure 3 :	Discontinuité et continuité du mécanisme de perception visuel. À gauche, exploration oculaire d'un visage [Yarbus, 1967], à droite, suivi visuel d'un vol de grues (http://blog.bassin-nature.com/)	37
Figure 4 :	<i>Vénus avec joueur de luth et Cupidon</i> , Titien 1565-70 (à gauche), <i>l'Aubade</i> , peinture de Pablo Picasso, 1942 (à droite)	43
Figure 5 :	<i>Nyak</i> , 1882, peinture de Edward HOPPER - New York, 1967	45
Figure 6 :	Utilisation graphique du principe de continuité Gestalt pour une création publicitaire « Gourmet » de Friskies (Lowe Lintas Amsterdam).....	46
Figure 7 :	Deux gravures de M.C. Escher : « <i>Exposition d'estampes</i> », 1956 (à gauche), « <i>Montée et descente</i> », 1960, ou comment agir sur la représentation pour suggérer une continuité spatiale ou temporelle (à droite).....	46
Figure 8 :	« <i>Whaam</i> » peinture de Roy Lichenstein (1963) inspirée de vignettes d'une bande dessinée, illustre la construction graphique d'une continuité temporelle dans une image statique (composition annotée par nos soins).	47
Figure 9 :	Expression visuelle du temps : <i>Le radeau de la Méduse</i> , peinture de Théodore Géricault, 1819 (à gauche), <i>Cheval au galop</i> , 1872, chronophotographie réalisée par Eadweard Muybridge (au centre), <i>Trafalgar et Météorite</i> , peinture de Samuel Alken, 1806 (à droite).....	48
Figure 10 :	Fichier GIF animé, par ARTIE.com, présentant en 42 images le déplacement d'une voiture. Le démarrage et le freinage sont fortement caricaturés (déformation graphique) pour renforcer l'effet visuel.	49
Figure 11 :	Animations graphiques dans DigiStrips : animation synchrone d'un même objet entre deux écrans (à gauche), feedback animé d'une sélection de clearance avec un nouveau niveau de vol (à droite).	50
Figure 12 :	Motion design, création de Christopher Lee.....	51
Figure 13 :	Continuité d'accès : dessin de Ching illustrant le principe de l'accès perceptif en fonction du niveau d'élévation (à gauche), continuité des espaces et ouvertures vers l'extérieur, Concrete Shell Villa (Japon) cabinet d'architecte ARTechnic (à droite)	52
Figure 14 :	Le modulator, un système de mesure harmonique pour l'architecture conçu par Le Corbusier (1943), métriques humaines basées sur le nombre d'or (à gauche), application aux formes architecturales (à droite).	53
Figure 15 :	Deux modèles formels architecturaux : plan d'un étage de bureau de la « Tour bleue » de Charleroi par l'architecte Jean Nouvel (à gauche), projet Coral Reef de l'architecte Vincent Callebaut (à droite).....	53
Figure 16 :	Séquence de dessins illustrant la vision sérielle d'un observateur traversant une ville, extrait du livre <i>The concise townscape</i> [Cullen 1961]	54
Figure 17 :	Architecture adaptative au contexte lumineux de la façade sud de l'Institut du Monde Arabe à Paris, architecte Jean Nouvel, 1989.....	55

Figure 18 :	Pour mener des activités complexes, l'utilisateur est contraint de sans cesse parcourir visuellement l'interface graphique et d'effectuer des incessants basculements entre ressources, outils et fenêtres applicatives	57
Figure 19 :	Design Praxis : Design jugements, figure extraite de l'article Dispelling Design as the 'Black Art' of CHI [Vetting Wolf 2006]	60
Figure 20 :	Affichage cockpit lors d'une séance d'observation d'un équipage sur simulateur A320.....	72
Figure 21 :	Informations textuelles sur les écrans ECAM/SD	74
Figure 22 :	Les écrans EFIS du cockpit intègrent (à gauche) le Primary Flight Display (PFD), et (à droite) le Navigation Display (ND).....	75
Figure 23 :	Représentations schématiques des systèmes avion de l'interface SD.....	76
Figure 26 :	Angle de vision, distances, et fréquences spatiales. $x = 2d (\tan\theta/2)$. Si $\theta = 1/60^\circ$ et $d = 12$ inches, alors $x = .0035$ «, ou 286 cycles/inch	78
Tableau 1 :	Calcul des angles visuels verticaux pour les 4 fontes CDS	78
Figure 27 :	Les symboles de la police CDS	79
Figure 28 :	6 exemples du dessin (filaire) des lettres de la police CDS et de l'impact visuel des choix géométriques (coniques, gabarit, espacement monospace...)	80
Figure 29 :	Rendu du caractère « A » dans les 4 tailles de fonte avec une épaisseur de tracé constante (à gauche), espacements visuels hétérogènes entre différents caractères affichés par une fonte CDS (à droite).	80
Figure 30 :	Lecture d'un texte : contexte d'usage, niveaux de perception et impacts du rendu de texte sur la lisibilité	81
Figure 31 :	Principe des mouvements oculaires pendant la lecture d'un texte.....	82
Figure 32 :	Champ et empan visuels : la vision de la partie centrale, projetée sur la fovéa est précise (vision haute fréquence) et devient de plus en plus floue dans les parties périphériques du champ récepteur (vision basse fréquence).....	83
Figure 33 :	Fréquences spatiales (à droite) d'un pattern de texte (à gauche) [Rubinstein 1988]....	84
Figure 34 :	Image simulée de l'effet visuel des fréquences spatiales sur la lecture du mot « lost »	85
Figure 35 :	Principales primitives typographiques (à gauche), nommage des différents composants de forme et de contreforme de la lettre (à droite).....	86
Figure 36 :	Structuration du texte, définition du corps et des alignements	88
Figure 37 :	Calames de roseaux taillés en biseau pour l'écriture manuscrite (à gauche), écriture Caroline tracé avec une plume biseautée et un angle régulier de 45° (à droite).....	88
Figure 38 :	Le dessin des caractères intègre des corrections optiques.	89
Figure 39 :	Variations typographiques de la police Univers, créée par Frutiger, montrant l'usage des invariants typographiques (à gauche). tableau matriciel des variations de <i>chasse</i> en x et de <i>graisse</i> en y de la forme du « u » (à droite).	90
Figure 40 :	Roissy, une typographie pour la signalétique de l'aéroport CDG (à gauche), éléments de design favorisant la lisibilité des caractères (à droite).....	91
Figure 41 :	La fonte Tiresias conçue pour l'affichage des sous-titres de télévision.....	92

Figure 42 :	Fontes DSNA, ODS (à gauche) et Blériot-radar (à droite)	92
Figure 43 :	Superposition de 36 glyphes alphanumériques de 10 fontes « lisibles ».....	96
Figure 44 :	Variations de design des caractères « J », « R », « Q », « 3 ».....	96
Figure 45 :	Choix de formes facilitant la discrimination des caractères	97
Figure 46 :	Application d'un flou gaussien sur des glyphes CDS, Blériot et Verdana.....	98
Figure 47 :	Application d'un flou gaussien sur les glyphes D, Q et O de la fonte CDS.....	99
Figure 48 :	Trois techniques graphiques utilisées dans le projet pour renforcer la lisibilité : Incises, Light Traps et Crossings	99
Figure 49 :	Amélioration du rendu par la technique du Half Biting, l'ajout ou le retrait d'un pixel aux angles des formes améliore le rendu visuel	100
Figure 50 :	La police Optima demi-bold d'Hermann Zapf.....	100
Figure 51 :	Modification des formes du « B » et du « 8 » pour améliorer la discrimination visuelle des caractères.....	101
Figure 52 :	Angle de tracé et création calligraphique des primitives de la lettre : fûts, traverses, panses et diagonales	102
Figure 53 :	Spécification des alignements typographiques de la fonte prototype	102
Figure 54 :	Premières études de formes pour la police prototype.....	103
Figure 55 :	Étude de vectorisation sous Illustrator, transcription vectorielle du style, empatement, courbures et attaques.	104
Figure 56 :	L'alphabet finalisé des lettres capitales et chiffres du prototype (à gauche), création de la lettre capitale « B » et de ses hintings avec FontForge (à droite).....	104
Figure 57 :	Jeu bitmap de glyphes des caractères alphanumériques rastérisés pour une hauteur capitale de 19 pixels, détail du « B » (à droite).	105
Figure 58 :	Dispositif expérimental des expérimentations de type 1, en contexte laboratoire (à gauche), en contexte cockpit (à droite).	106
Figure 59 :	Les stimuli des 3 fontes testées avec leurs 36 glyphes alphanumériques.....	107
Figure 60 :	Résultats du test d'ajustement de la valeur de contraste (sujet 5).....	108
Figure 61 :	Répartition des réponses par distance et par fonte pour les 12 sujets.....	109
Figure 62 :	Nombre de bonnes réponses (à gauche), mauvaises réponses (au centre) et non-réponses pour les fontes CDS, Verdana (VER) et TypoAero (TYP).	110
Figure 63 :	Matrices de confusion pour les fontes CDS (à gauche), et TypoAero (à droite), des réponses compilées (12 sujets × 2 essais) pour une distance de 100 cm.....	111
Figure 64 :	Différences entre images des glyphes 1/I et 5/S des fontes TYP et VER.....	112
Figure 65 :	Distribution des confusions pour les glyphes 1, 7, 8 et H de la fonte prototype TypoAero, résultats de l'expérimentation 1.	112
Figure 66 :	Les 3 jeux de caractères testés avec 3 différentes valeurs de graisse.....	113
Figure 67 :	Grille de recherche de 10 × 10 caractères, affichée dans les 3 polarités, sur 3 couleurs de fond, noir, blanc et gris.	113

Figure 68 :	Moyenne du temps de réponse pour chaque graisse (A, B, C), pour les 3 polarités d'affichage (fond blanc, noir, gris), (en haut) avec un contraste faible, (en bas) avec un contraste normal.....	114
Figure 69 :	Comparaison par paires de 2 pseudo-mots pour 2 valeurs de graisse.....	115
Figure 70 :	Expérimentation 2, une plage de valeurs possibles pour la graisse, (à droite) détail de l'écart possible pour le design des fûts.....	115
Figure 71 :	Exemple d'affichage multi écrans d'une situation opérationnelle pour la moitié gauche du cockpit.....	116
Figure 72 :	Exemple de pages utilisées pour le pairwise et comparant côte à côte une interface avec les 2 fontes CDS (à gauche) et TypoAero (à droite).....	117
Figure 73 :	Moyenne des préférences (tous sujets, tous écrans).....	118
Figure 74 :	Moyenne (tous sujets) des préférences entre fontes par écran et pour les 2 contextes lumineux : (en haut) jour et (en bas) nuit.....	118
Figure 75 :	Moyenne des préférences (tous sujets) entre fontes pour chacun des écrans.....	120
Figure 76 :	Les 4 variantes de fontes AI-B612 à espacement proportionnel, Regular, Italic, Bold et BoldItalic.....	121
Figure 77 :	Les 4 variantes de fontes AI-B612 à espacement monospace, Mono Regular, Mono Italic, Mono Bold et Mono BoldItalic	121
Figure 78 :	Extraits du jeu de caractères étendu de la police AI-B612	122
Figure 79 :	<i>Strip'TIC</i> , un espace interactif tangible pour les contrôleurs aériens.....	129
Figure 80 :	L'architecture contemporaine favorise la continuité des espaces : Shell villa, Japon, Nagano architecture (à gauche), projet du nouveau Centre des Congrès de Nancy, Atelier Barani (à droite).	130
Figure 81 :	En 1980, les artistes Galloway et Rabinowicz proposent un projet d'installation utilisant le système de communication par satellite pour relier pendant 3 jours deux rues entre la côte Est et Ouest de l'Amérique.....	131
Figure 82 :	Nouveaux espaces publics hybrides (à gauche), visualisation conceptuelle du modèle Aperture [Cingolani 2010] (à droite).	131
Figure 83 :	Schéma du modèle MCRit des TUI de Ullmer & Ishii [Ullmer 2010]	132
Figure 84 :	Un strip papier de contrôle en-route avec les informations imprimées de plan de vol et les annotations et instructions manuscrites du contrôleur	134
Figure 85 :	Schéma de principe des phases de contrôle, les secteurs d'approche (en vert) concernent le début (après le décollage) et la fin (avant l'atterrissage) du vol.	134
Figure 86 :	Écran radar de contrôle aérien d'approche (à gauche), contrôleurs aériens en vigie de l'aéroport CDG (à droite).....	135
Figure 87 :	Schéma de principe des stacks (ici <i>Blue</i> et <i>Red</i>) et calcul des heures d'arrivée prévues et de l' <i>Estimated Approach Time</i> (EAT) de séquençement des sorties de stacks.....	135
Figure 88 :	Contrôle d'approche : écran radar et tableau de strips.....	136
Figure 89 :	Image radar d'études ODS-Érato, avec listes de vols (dyps), agenda Érato et strip électronique du vol sélectionné (en bas à droite).....	137

Figure 90 :	Caméléon, prototype d'un tableau de strips augmentés. (à gauche) le porte-strip en résine incluant une résistance électrique, (au centre) une colonne de strips sur leur porte-strip, (à droite) interactions entre tableau de strips et image radar.....	138
Figure 91 :	DigiStrips (v2 1998), une interface de stripping électronique basée sur l'interaction tactile, la reconnaissance de geste, l'animation et le design graphique.....	139
Figure 92 :	Digistrips, continuité visuelle et interactive entre tableaux de strips des contrôleurs organique et radariste	140
Figure 93 :	<i>SmartStrips</i> , un système de stripping électronique basé sur DigiStrips et développé par Frequentis pour les centres de contrôle en-route et approche. Ici au centre de contrôle du NATS à Prestwick (London, UK)	140
Figure 94 :	Interface Aster pour le contrôle des secteurs terminaux réalisé par le CENA avec Intactile Design	141
Figure 95 :	Projet de recherche Mammi, financé par Eurocontrol et mené en partenariat par l'ENAC, Intuilab et Intactile Design.....	142
Figure 96 :	Le dispositif Strip'TIC (V2) intégré à un meuble de contrôle.	143
Figure 97 :	Le tableau de strips de strip'TIC, réalisé en verre, permet aux contrôleurs d'aligner les strips papier, au fond l'image radar	144
Figure 98 :	Le pattern Anoto (à gauche), adaptation pour Strip'TIC des surfaces de projection pour l'utilisation du stylo Anoto (à droite).....	144
Figure 99 :	Pour repérer les strips, l'image IR d'une caméra située sous le tableau est traitée (filtre vidéo) pour identifier les patterns AR imprimés au dos des strips.....	145
Figure 100 :	Observations des contrôleurs d'approche et de tour à Blagnac.....	146
Figure 101 :	Typologie de gestes observés avec l'usage d'un tableau de strips. a) geste « beat » pour soutenir une description de trajectoire, b) saisie d'un strip de l'imprimante, c, d) bimanualité, 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. [Gauthier 2014].....	147
Figure 102 :	Ateliers de conception participative (juillet 2012) : un échange de point de vue entre contrôleurs (à gauche), maquettage par un contrôleur du suivi de l'évolution de l'altitude du vol (à droite).	148
Figure 103 :	Interaction généralisée avec Anoto (à gauche) filtrage initié sur un strip en dehors du tableau, (à droite) sélection au stylo sur l'écran radar	149
Figure 104 :	Composition des surfaces du dispositif recouvertes de la trame Anoto et permettant de produire des événements avec le stylo : écrans radar et secondaire, tableau de strips, strips papier présents sur la position, tablette mobile.	150
Figure 105 :	Utilisation des pages d'adressage Anoto. Les pages utilisées pour les écrans sont positionnées en mode paysage (landscape)	150
Figure 106 :	Interaction de filtrage réalisé avec le stylo Anoto : à partir d'un strip positionné sur le tableau (à gauche), avec un strip hors tableau (au centre), à partir de l'image radar (à droite).....	152

Figure 107 :	Interaction avec le stylo Anoto de notation utilisant un principe d'extension sur le tableau de strips du strip papier par une partie virtuelle.....	153
Figure 108 :	Le tableau des strips de Strip'TIC, un <i>Window Manager</i> aux vues mixtes physiques et numériques contrôlées par la partie physique de l'objet.....	154
Figure 109 :	Window Manager et interface graphique : OS NeXTSTEP de NeXT Computer (à gauche) et Mac OS X d'Apple (à droite).....	155
Figure 110 :	Un extrait de méthodes C# dans Strip'TIC permettant l'envoi d'un message sur le bus Ivy pour traiter les événements du stylo Anoto : génération d'un message Ivy <i>IvyStripBoardPenMove</i> (en haut) qui utilise une méthode de transformation des coordonnées <i>GetNormalizedCoordinate</i> (au centre), utilisant elle-même la méthode <i>GenericScaleF</i> de la librairie DATA.MathTools (en bas)	158
Figure 111 :	Strip physique papier et strip virtuel	159
Figure 112 :	Saisie d'une clearance d'autorisation de niveau sur un strip virtuel.....	160
Figure 113 :	Le calcul tangible d'une séquence d'heures de sortie (HAP) de stacks	161
Figure 114 :	Un strip tangible « AF455BQ » associant strip papier, impression carbone des informations plan de vol, saisies manuscrites à l'encre du contrôleur, projection inférieure du porte-strip et informations augmentées projetées sur le strip	164
Figure 115 :	Éclaté de principe des couches d'impression physiques et lumineuses du strip pour le vol « AF455BQ ».....	164
Figure 116 :	Modalités de mélange perceptif réel-virtuel dans Strip'TIC, fusion optique de recoloration du strip et projection du porte-strip (à gauche), surimpression de la trajectoire verticale de l'avion sur la zone niveaux du strip (à droite).....	166
Figure 117 :	Le strip papier, un support physique souple spécialement adapté pour la manipulation et pour l'écriture	167
Figure 118 :	Effet visuel produit par la superposition physique des strips papier	169
Figure 119 :	Persistance des informations imprimées sur le strip : un strip physique archive l'ensemble des impressions toner et manuscrites (à gauche), projection éphémère d'informations HAP calculées par le système (à droite).....	170
Figure 120 :	Organisation spatiale du tableau de strips : dans le centre de contrôle en-route de Bordeaux (à gauche), sur le prototype Strip'TIC (à droite).	171
Figure 121 :	Un test de codage d'une fonction « timer » pour indiquer au contrôleur un délai d'attente avant décollage dû à une turbulence de sillage.....	172
Figure 122 :	Schéma du dispositif interactif tangible de Strip'TIC présentant : b) les strips physiques positionnés sur le tableau, permettant à la fois de contrôler le modèle de données ATC et (a) l'affichage des informations augmentées projetées par le système, et (c) servant de supports à l'externalisation cognitive des informations et des actions des contrôleurs pour la gestion du trafic aérien	173
Figure 123 :	Affichage d'un strip virtuel «informationnel» au bas du tableau de strips, correspondant à un vol non directement en responsabilité des contrôleurs de la position	176
Figure 124 :	Séquence de photos présentant une interaction gestuelle de copie d'un strip virtuel à partir d'un strip papier dans Strip'TIC [Gauthier 2014].....	177
Figure 125 :	Du Xerox Star au Lisa d'Apple, GUI, paradigme WIMP, et modèle d'affichage écran bitmap inspiré du papier et de l'encre	186

Figure 126 :	Opacité et fermeture graphique des fenêtres, Mac OS 9 - 1999 (à gauche), Mac OS X 10.9.2 - 2013 (à droite).....	188
Figure 127 :	Windows 8 Modern UI, mode desktop fenêtré du traditionnel GUI (à gauche), mode Smartphone basé sur une composition en tuiles (à droite)	189
Figure 128 :	OpenDoc une plate-forme logicielle pour l'édition de documents composites, vues spécialisées : templates, scenegraph, page layout (à gauche), édition d'un objet vectoriel d'habillage d'un document composite (à droite)	191
Figure 129 :	Deux modalités d'affichage et de transformations dans l'espace GUI, espace écran orienté pixel et rigidité graphique pour les widgets système, et espace contenu orienté données avec vue transformable par l'utilisateur.....	192
Figure 130 :	Représentations abstraites et mode vignette dans le Finder, et mode WYSIWYG avec Acrobat, d'un même document texte	193
Figure 131 :	Représentation de type iconique des fichiers répertoires avec le Finder Mac OS X (à gauche), avec Windows File Explorer (à droite)	194
Figure 132 :	Représentation mode « colonne » dans le Finder avec une double vue hiérarchique du chemin d'accès (colonnes + barre chemin d'accès)	195
Figure 133 :	Réinventer l'espace graphique 2D du GUI, de gauche à droite : <i>Metisse, BumpTop, SpaceTop</i> et <i>Mélange</i>	196
Figure 134 :	<i>Elastic Windows</i> - 1996 (à gauche), <i>Multiple Windows Coordinations</i> 1998 (au centre), <i>Visual Link across Applications</i> - 2010 (à droite).....	198
Figure 135 :	<i>Generalized and Stationary Scrolling</i> , 1999 (à gauche), <i>PageLinker</i> , 2007 (au centre), <i>Dwell-and-Spring</i> , 2012 (à droite).	199
Figure 136 :	Illustrations de techniques de visualisations. <i>Hyperpollic tree</i> - T. Munzner (à gauche), <i>Treemaps</i> - J.D. Fekete (au centre), <i>Information landscape</i> - M. Eyl (à droite).	201
Figure 137 :	<i>Artistic Resizing</i> (à gauche), <i>Video Browsing</i> (au centre), <i>Transitions visuelles différentiées</i> (à droite).	202
Figure 138 :	<i>FromDady</i> , transition visuelle contrôlée par l'utilisateur d'une visualisation de données de trafic sur la France, entre une vue Latitude Longitude (à gauche) et une vue Altitude Longitude (à droite).	203
Figure 139 :	<i>Color Tunneling</i> , transition contrôlée entre une vue image et une vue de l'espace chromatique	203
Figure 140 :	Accès par transparence aux contenus [Elmqvist 2007] (à gauche), historique d'usage des fichiers [Fitchett 2013] (à droite en haut), codage de datation temporelle des images [Conversy 2003] (à droite en bas).	204
Figure 141 :	Accès au contenu caché <i>Intercating with Hidden Content</i> [Ishak 2004] (à gauche), <i>Visualizing Hidden Content</i> [Geymayer 2014] (à droite).....	205
Figure 142 :	Abstraction visuelle et simplification d'image [Winnemoller 2012] (à gauche et au centre), <i>Parallel Pies</i> [Terry 2004] (à droite).....	206
Figure 143 :	Conception du nouveau centre de congrès de Nancy, Marc Barani architecte.....	209
Figure 144 :	Rampe continue d'exposition du musée Guggenheim de New-York, architecte Franck Lloyd Wright	209
Figure 145 :	Formes et déformation urbaines et architecturales, projet pour Saint-Petersbourg, J.B. A. Leblond, 1717 (à gauche), Palais Massini à Rome, XVI ^e siècle (à droite).	211

Figure 146 :	Un concept de matériau intelligent, ici une fibre composite permet l'adaptation de la forme architecturale à l'environnement. Design M. Mingallon, S. Ramaswamy, K. Karatzas.....	211
Figure 147 :	Interfaces graphiques multi-écrans pour l'aéronautique, cockpit de l'A350 (à gauche), détail de deux pages MFD (Multi Functional Display) affichant un ensemble de widgets (à droite).....	213
Figure 148 :	Interfaces SVS pour le cockpit : vue synthétique 3D du système SVS du Falcon 900 (à gauche), système SVS <i>Primus Epic 2.0</i> d'Honeywell pour le cockpit des programmes Gulfstream et Falcon (à droite).....	213
Figure 149 :	Nouveaux concepts de cockpit étudiés par Thales, démonstrateur <i>ODICIS</i> de surface continue (à gauche), Cockpit <i>avionics 2020</i> (à droite).....	214
Figure 150 :	Surface d'affichage versus densité d'information : composition d'applications multiples sur un écran 30» (à gauche), affichage graphique complexe d'une application browser sur smartphone (à droite).....	215
Figure 151 :	Deux exemples d'environnement matériel / système présentés par deux participants de l'atelier pour décrire leur usage informatique personnel	217
Figure 152 :	Identification sur post-it par les participants, des tâches professionnelles habituelles réalisées à l'aide des outils informatiques	217
Figure 153 :	Deux exemples présentant l'usage de différents logiciels et outils pour supporter les activités habituelles de deux participants.....	217
Figure 154 :	Un usage du Finder pour structurer l'activité, avec un code couleur d'avancement et un nommage des fichiers orienté date projet.....	218
Figure 155 :	Composition écran et basculement de focus entre les quatre applications logicielles « empilées », pour réaliser un travail de retranscription.....	219
Figure 156 :	Schéma de principe des parties prenantes dans le contrôle de l'affichage final des interfaces du cockpit.....	220
Figure 157 :	Schéma de principe des parties prenantes dans le contrôle de l'affichage final des interfaces graphiques utilisateur	221
Figure 158 :	Schéma de principe des parties prenantes du contrôle de l'affichage graphique de l'interface d'un « continuous GUI ».....	224
Tableau 2 :	Extrait des idées proposées.....	226
Figure 159 :	Rough de principe d'une composition en zones PF et PNF du cockpit.....	227
Figure 160 :	Trois roughs illustrant le concept d'espace utilisateur multi-plan : plans superposés avec application multi-plans filtrée (en haut à gauche), réhaussement vertical d'une partie de plan (en haut à droite), relief multi-plans avec filtrage d'une tranche verticale (viewspace) d'affichage (en bas).	228
Figure 161 :	Rough de principe d'une organisation des plans de travail à l'écran, contrôlable à l'aide de diagrammes (sliders) permettant de filtrer l'affichage et le focus.....	229
Figure 162 :	Illustration numérique d'un concept de Place d'activités permettant le regroupement, l'organisation et l'édition de ressources.....	230
Figure 163 :	Roughs de principe explorant une fonctionnalité d'association entre plusieurs fenêtres superposées, avec une zone de transition contrôlable.....	230
Figure 164 :	Story-board numérique illustrant un accès continu au contenu de répertoires : expansion révélant et ouvrant progressivement le contenu.....	231

Figure 165 :	Illustration numérique d'une composition libre des informations sur la zone PNF (Pilot Non Flying) de la surface interactive du cockpit pour explorer une solution à un problème de vol.....	232
Figure 166 :	Projet D2COS, spécification graphique de 2 niveaux de représentation sémantique des informations vol (à gauche), transformation interactive continue entre les deux niveaux (à droite).....	234
Figure 167 :	Expanding Keyboard, mode sans expansion (à gauche), mode expanding target déclenché automatiquement suite à une réduction de la taille de fenêtre de l'outil pour garantir l'interaction (à droite) vues à tailles « réelle » et agrandie.	235
Figure 168 :	Illustration de l'usage d'un clavier logiciel intégré à Word, librement redimensionnable par l'utilisateur, avec fonction fish-eye, et produisant une interaction en proximité et en continuité de la saisie.	236
Figure 169 :	Augmented Boundaries, premier prototype semi-fonctionnel, a. 3 fenêtres applicatives (2 pseudos Finders, 1 pseudo Word), b. le drag&drop d'un objet répertoire est utilisé pour créer un marqueur sur la bordure du traitement de texte, c. ajout d'un deuxième marqueur (répertoire « Aeronautics »), d. ouverture du marker, e. parcours des images du marker avec effet expanding, f. drag&drop de l'image sélectionnée vers le texte.	238
Figure 170 :	Une première illustration du scénario 4 « Windows Transitions » maquetée avec PhotoShop.....	240
Figure 171 :	Story-board numérique illustrant le principe de transition entre les contenus de deux fenêtres superposées.....	240
Figure 172 :	Premier prototype fonctionnel de <i>Windows Transitions</i> réalisé avec djnn.....	241
Figure 173 :	Deuxième prototype fonctionnel de <i>Window Transition</i> réalisé avec djnn, et implémentant le scénario 4 de transcription d'un atelier.....	242

Du design graphique à la recherche en IHM

Il me semble important, en préambule à la présentation de ce mémoire de recherche, de situer où ce travail s'enracine et d'explicitier le point de vue particulier de ma démarche.

Mon parcours initial de designer a profondément construit mon regard et ma pensée sur le monde et sur l'humain. Cinq années de cours et d'ateliers à l'ENSAAMA¹ Paris m'ont permis d'étudier, d'expérimenter les théories et techniques des Arts plastiques, mais aussi de mettre en œuvre ces connaissances dans des domaines d'arts appliqués tels que l'architecture, le design produit ou la communication visuelle. Cette double approche, entre art et industrie, s'est développée et structurée entre enseignements artistiques à l'analyse sensible, à l'esthétique et à la création graphique, et formation à l'ingénierie, à la fonction, et aux usages.

La mise en œuvre de ce métier de designer pour la conception d'interfaces numériques et de systèmes interactifs s'est faite dans une sorte d'« évidence », comme son application à un nouveau support du design. Elle est devenue aussi, dans un premier temps, le lieu d'un véritable choc, voire d'un antagonisme — sémantique, syntaxique et culturel — entre création et formalisation, entre polysémie et monosémie, entre arts et sciences. Cette confrontation-rencontre a imposé, de fait, une évolution de ma pratique professionnelle. Elle s'est concrétisée pendant quinze années au sein d'équipes pluridisciplinaires de recherche en IHM², dans un contexte d'études et de recherche appliquées aux domaines critiques du contrôle aérien et de l'aéronautique. Ce nouveau cheminement entre design et recherche a souvent eu pour cadre des projets opérationnels, en lien étroit avec les utilisateurs, contrôleurs aériens, techniciens ou pilotes, aboutissant à des mises en service réelles. Ont été traitées des problématiques telles que la visualisation d'information, le design graphique des IHM, l'utilisabilité, ou les méthodes et outils de conception et d'évaluation, en intégrant des principes, et des techniques, issus du monde de l'art dans le cadre d'une approche « sensible » des espaces interactifs.

La participation à des projets de recherche m'a conduit à rencontrer la communauté de l'Interaction Homme-Machine au travers notamment de conférences, mais aussi à publier, en tant que coauteur, des articles traitant de questions

1 ENSAAMA : École Nationale Supérieure des Arts Appliqués et Métiers d'Art, Olivier-de-Serres Paris 15^e.

2 Intégré aux équipes de recherche IHM du CENA puis de la DTI/R&D (équipes Imagine et PII), puis du Laboratoire LII de l'ENAC.

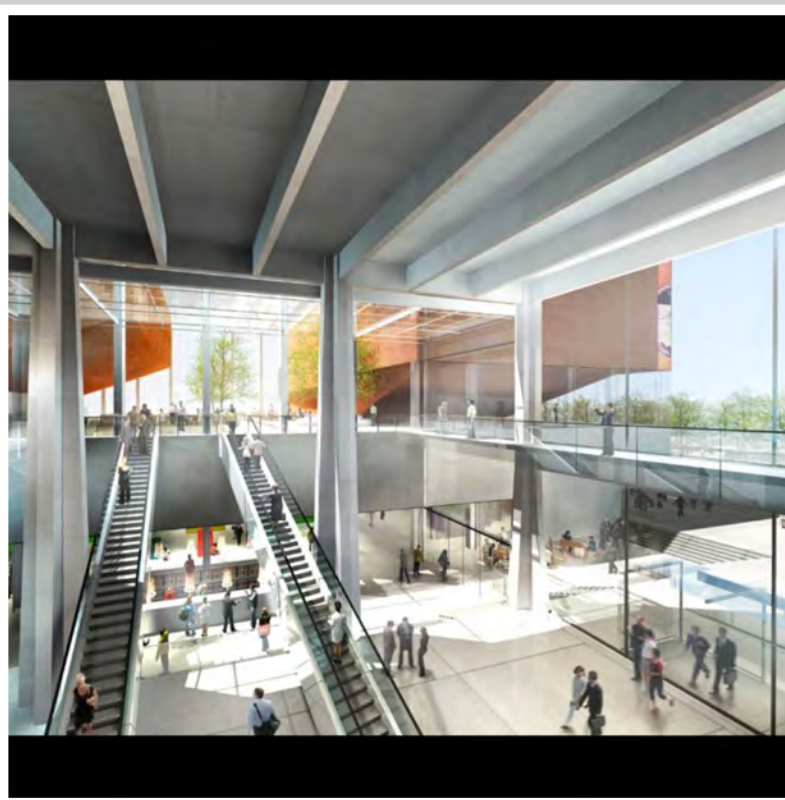
à dominante informatique. Il a donc été essentiel pour dépasser les clivages culturels et rendre complémentaires les points de vue entre champs disciplinaires, de transformer ce parcours en un processus d'« hybridation culturelle », entre design et informatique, entre arts et sciences. Impliqué dans des projets de recherche comme « designer embarqué », ma contribution s'est inscrite dans une démarche plus explicitement transdisciplinaire.

Ce travail et cette évolution m'ont conduit naturellement et « tardivement » à m'engager plus avant dans la démarche académique. Membre associé de l'équipe IHM de Philippe Palanque à l'IRIT (IHCS puis ICS), j'ai décidé de m'inscrire en tant qu'étudiant au Master Interaction Homme-Machine de Toulouse (où j'enseigne et suis responsable d'une U.E. représentation d'information), dans le but de poursuivre une thèse en informatique. J'ai dans le même temps rejoint l'équipe de Stéphane Chatty du Laboratoire d'Informatique Interactive (LII) de l'ENAC, comme enseignant-chercheur.

C'est avec le soutien et sous la direction de Stéphane Conversy, avec qui je travaille depuis de nombreuses années pour des travaux de recherche, que je présente aujourd'hui ces travaux. Si ce mémoire a pour ambition principale de restituer le travail académique réalisé pendant ce doctorat, il tente aussi de transmettre une démarche conceptuelle particulière qui s'ancre et s'articule entre deux champs disciplinaires : le design et l'interaction homme-machine.

INTRODUCTION

***Continuité* : émergence d'un concept
au service de l'architecture graphique
des interfaces humain-système.**



Conception du nouveau Centre des Congrès de Nancy,
Marc Barani architecte

Continuité : émergence d'un concept au service de l'architecture graphique des interfaces humain-système

À Ixabel

“ *We build too many walls and not enough bridges* ³ ”

Sir Isaac Newton (1643-1727)

L'évolution des interfaces utilisateurs des systèmes interactifs, systèmes critiques comme ceux des cockpits avion ou dispositifs *End-User* comme les ordinateurs personnels, est caractérisée par une augmentation continue du nombre d'informations et de fonctions accessibles.

Les interfaces du poste de pilotage (cockpit) des avions commerciaux permettent aux pilotes d'accéder à de très nombreuses informations, agrégées à partir de multiples systèmes, pour supporter des activités complexes. Ces systèmes complexes intègrent et font coopérer plusieurs opérateurs humains, mais aussi des agents artificiels comme le Pilote Automatique (PA), et nécessitent des interfaces qui permettent une conscience partagée de la situation et de l'état du système. Les dispositifs informatiques grand public, ordinateurs personnels ou smartphones, ont vu s'accroître très fortement la résolution des écrans et le nombre des informations affichées simultanément. Ces systèmes sont utilisés pour supporter des activités multiples dont la réalisation exige l'utilisation conjointe ou séquentielle de nombreuses données et de plusieurs « écrans », vues, applications, ou ressources.

Cette complexification des interfaces graphiques pose des problèmes aux utilisateurs en termes de capacité perceptive et de lisibilité de l'interface (densité, concurrence, segmentation, des informations), et d'utilisabilité des systèmes (fractionnement, interruption, permutation, des tâches et de l'action).

La *continuité* réfère à notre capacité à « mettre du lien » entre des objets, actions ou événements présentant une proximité ou similarité dans l'espace ou dans le temps, même s'ils sont physiquement ou sémantiquement séparés, pour en faire les parties comprises d'un tout « *d'une seule tenue* ».

Cette capacité répond à un besoin de simplification et de structuration de la perception visuelle humaine. Ainsi, les stimuli captés simultanément par

³ « *Les hommes construisent trop de murs et pas assez de ponts.* » Citation attribuée à Newton par le Père Dominique Pire, prix Nobel de la paix, lors de son discours à la Conférence Nobel du 11 décembre 1958 à Oslo.

de nombreux récepteurs, comme ceux des cellules photoréceptrices de la rétine⁴, ou perçus par des modalités perceptuelles différentes, sont transmis de façon parallèle au cerveau, mais n'aboutissent qu'à une sensation perceptuelle unique. Ainsi, nous cherchons visuellement à poursuivre un ensemble perceptuel formé par le déplacement synchrone de plusieurs objets, plutôt que d'observer de façon détaillée chacun de ses objets. C'est à partir de cette capacité à percevoir les *continuités* que nous pouvons lire aisément un texte composé de façon régulière ou appréhender et parcourir les structures graphiques. Dans le même temps, la recherche et l'identification visuelle des éléments d'information *utiles*, la discrimination d'un objet particulier ou d'un caractère parmi d'autres, sont rendues possibles par la présence de ruptures et de saillances visuelles, ou *discontinuités*.

Continuité et *discontinuité* forment ainsi les principes consubstantiels d'une lecture performante et structurée des formes et des espaces, qui permet de construire une image mentale cohérente et continue du monde et de la situation.

Nous faisons l'hypothèse que le **concept de continuité**, formé avec ce double principe de *continuité* et *discontinuité*, peut constituer un outil particulièrement adapté pour répondre à cette évolution des systèmes interactifs, et plus précisément pour supporter la conception des interfaces utilisateurs des systèmes interactifs complexes. Nous considérons que le concept de continuité et son instrumentation, mis au profit d'une structuration graphique et interactive plus « cohérente » et « ouverte » des composants de l'interface, peuvent aider à la fois les concepteurs des interfaces et les utilisateurs de ces systèmes interactifs à mieux représenter et à mieux appréhender l'information dans un contexte d'affichage complexe.

Cette acception d'un concept complexe, articulée autour d'une apparente dualité sous ses deux aspects consubstantiels de *continuité* et *discontinuité*, doit permettre de concevoir les relations d'éléments graphiques au sein de structures interactives. Par exemple, le design de jeux de formes graphiques dont les propriétés visuelles adressent à la fois, le besoin de discrimination et d'identification de chacun des objets, les relations structurelles entre ces objets, la continuité d'usage — de lecture, de manipulation — des compositions. Le concept de continuité doit permettre également de penser l'espace interactif de façon plus cohérente, avec des représentations et des interactions plus continues au sein de cet espace. Nous pensons ainsi ce concept particulièrement adapté au design des espaces d'interaction tangibles, mixtes ou augmentés, associant les deux dimensions physique et numérique. Enfin, notre point de vue étant d'abord graphique, nous postulons que le concept de continuité est un matériau particulièrement adéquat pour mieux « architecturer » le design de l'interface graphique des systèmes interactifs.

Notre objectif est, à partir d'une analyse initiale et multidisciplinaire du terme de continuité, d'interroger la pertinence d'un tel concept pour l'interaction. Nous proposons ainsi d'analyser sa forme lexicale et de parcourir plus large-

4 Dans le système visuel humain, la rétine est composée de très nombreux photorécepteurs, les bâtonnets, très sensibles à de faibles lumières, captent les luminosités, et les cônes de sous-type L, M, S (rouge, vert, bleu), adaptés à la vision diurne et concentrés vers la zone fovéale, participent à la vision trichromatique des couleurs.

ment les acceptions et usages de la continuité dans des domaines autres que l'informatique. Cette étude préalable du concept réfère aux domaines scientifiques et artistiques, en se concentrant particulièrement sur les problématiques visuelles, plastiques et de la conception des espaces. Nous confrontons ensuite ces notions aux besoins et exigences de l'interface graphique des systèmes interactifs. Cette analyse initiale nous permet de construire et de formuler une problématique de recherche sur les apports potentiels du concept de continuité pour l'interaction homme-machine.

Trois projets informatiques et de recherche sont rapportés qui constituent autant de terrains d'expérimentation, et de réalisations concrètes pour observer, explorer et valider le concept de continuité dans l'IHM.

Une approche basée sur l'expérimentation démontre la pertinence des principes de continuité et de discontinuité pour le design de jeux de formes typographiques adaptées aux contextes d'usage critiques. Un des résultats de cette recherche est la livraison à la société Airbus de huit fontes de caractères numériques pour la conception des futures interfaces du cockpit.

Le projet StripTIC permet de mettre en évidence les dimensions et propriétés de la continuité dans la conception d'un espace interactif tangible pour les contrôleurs aériens. Il confirme la portée du concept pour penser la cohérence des systèmes interactifs entre mondes physique et numérique.

Enfin dans une démarche de recherche orientée design, sont élaborés les principes graphiques de *limites* et de *passages* d'un concept de continuité visant à architecturer l'interface graphique utilisateur des systèmes interactifs complexes. Une mise en œuvre de ces principes sous forme de maquettes et de prototypes permet d'exposer les potentiels graphiques du concept.

1.1. Définitions

■ ÉTYMOLOGIE :

Dictionnaire latin-français Gaffiot (1934) : *continuitas*, *atis*, f. (*continuus*), continuité, liaison. *continuus*, *a*, *um* (contineo), continu, consécutif, qui tient à. *contineo*, *tinui*, *tentum*, *ere*. (*cum et teneo*), maintenir uni, se relier, contenir *continuo*, *avi*, *atum*, *are*, tr. joindre de manière à former un tout sans interruption.

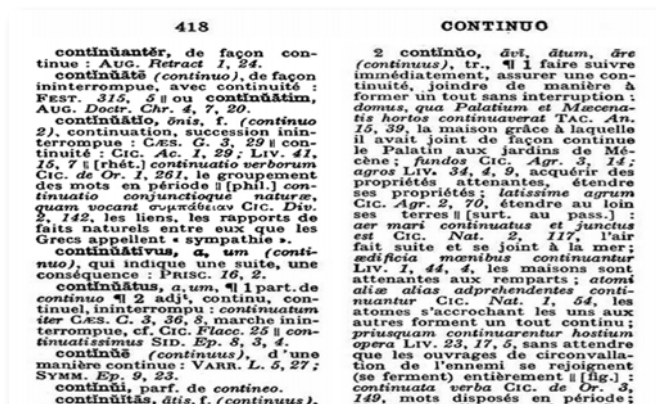


Figure 1 : Extrait d'une page du Gaffiot - www.lexilogos.com/latin/gaffiot.php

■ DICTIONNAIRES DE LANGUE FRANÇAISE :

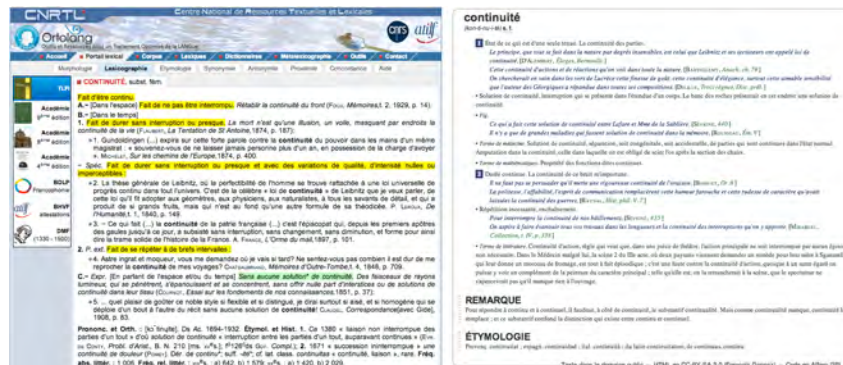


Figure 2 : Définitions du mot continuité, (à gauche) page lexicale du terme sur le portail du CNRTL (CNRS), (à droite) définition du mot continuité sur la version électronique du dictionnaire Le Littré de la langue française

Il n'existe pas de définition simple et évidente de la continuité. Le terme de continuité, d'étymologie latine « *continuitas* » { continuité, liaison } (Figure 1) est dérivé du mot latin *continuitatem*, *continuus* { continu, adjacent, immédiatement après, qui tient à } ; formant le subst. *continuat* { continuation, succession ininterrompue, groupement en séquence, liens, rapports de faits naturels entre eux (que les Grecs appellent «sympathie»); et du verbe *contineo* { faire suivre immédiatement, tenir ensemble, joindre de manière à former un tout sans interruption (dans l'espace) ou faire succéder sans interruption (dans le temps), faire durer, continuer, accrocher, attacher, prolonger, étendre, rejoindre } ; de *contingo* : { toucher, atteindre } ⁵.

Dans les définitions consultées, notamment celles du Centre National de Ressources Textuelles Lexicales [CNRTL]⁶ du CNRS (cf. Figure 2 à gauche) et du Dictionnaire Émile Littré [Littré]⁷ de la langue française (cf. Figure 2 à droite), le terme de continuité réfère à la continuation physique ou temporelle — par opposition à l'existence d'une rupture, cessation ou interruption — d'une ou entre plusieurs choses ou événements. Il renvoie à l'existence d'un lien, d'une relation particulière entre les objets ou parties d'un tout, ensemble ou groupement. Ces termes caractérisent à la fois les notions de permanence (de l'objet ou état), d'homogénéité (cohésion, régularité) et d'appartenance (à un groupe, à un tout), sens qui renvoient à la notion d'identité ; et l'existence d'une liaison forte (jonction, ordonnancement, succession) sans ou presque sans rupture, au niveau spatial, temporel, physique, formel, logique ou sémantique. La continuité exprimerait donc un rapport particulier, d'identité, de similarité, de cohérence, ou d'organisation, perceptuel ou constitutif entre objets ou parties d'une entité ou association observable.

■ CATÉGORIES DE SENS

En nous appuyant sur ces définitions, nous pouvons identifier un premier ensemble de sens ou acceptions pour les termes antonymes, mais qui nous paraissent « inséparables » de Continuité et de Discontinuité. La continuité étant d'abord formulée comme une absence de discontinuité. Il nous semble

⁵ Dictionnaire Latin Français F. Gaffiot : <http://www.lexilogos.com/latin/gaffiot.php> [Gaffiot 1934]

⁶ Centre National de Ressources Textuelles Lexicales, portail CNRS de ressources linguistiques informatisées, <http://www.cnrtl.fr> [CNRTL]

⁷ Dictionnaire émile Littré de la langue française - <http://www.littre.org/>

important à cet égard de reprendre le principe de *dialogique* formulé par Edgar Morin dans son introduction à la pensée complexe [Morin 1990] comme la nécessité opératoire d'appréhender ensemble, sans antagonisme et pour en assurer la complétude de sens, les termes de continuité et de discontinuité. Nous regroupons ainsi les catégories de sens renvoyant de façon symétrique à ces deux termes sous une labélisation unique formée à partir du seul terme de continuité :

[Acp.1] *Continuité identité-appartenance* : La notion d'identité renvoie aux deux principes de discontinuité et de continuité qui la construisent de façon complémentaire. Identité-discrimination de l'objet dont la discontinuité même, de forme par exemple, le rend « unique » et permet son identification visuelle parmi tous les autres. Par exemple les *glyphes archétypes* de la lettre en typographie [Haralambous 2004] caractérisant un modèle de forme pour la représentation visuelle du caractère qui pourra être dérivé en instance de *signe typographique*. Identité-appartenance de l'objet en relation structurelle à son environnement dont la similitude perceptuelle avec d'autres objets, formée par une ou plusieurs propriétés visuelles communes, l'intègre avec ces autres objets à un tout partagé (structure), qui l'organise et lui donne sens. Par exemple la codification visuelle des notes sur une partition de musique, avec une régularité graphique du tracé des notes et des liaisons sur la composition de type *datum* [Ching 2007] des lignes de la portée.

[Acp.2] *Continuité de liaison-inséparabilité* : La notion de liaison correspond à une continuité réalisée dans l'espace ou vécue dans le temps. Relation dans l'espace d'éléments physiques accolés, accrochés, attachés, connectés les uns aux autres sans discontinuité, comme la succession de murs et de tours du rempart d'enceinte d'une ville fortifiée. Succession temporelle de perceptions ou d'événements ne présentant pas de rupture apparente, comme la perception de continuité des images statiques d'un film ou d'une animation. La discontinuité caractérisera ici la relation particulière de distance entre ces objets, concrétisée par les espaces vides, ruptures visuelles ou silences qui les séparent.

[Acp.3] *Continuité de mouvement-déplacement* : La notion de mouvement (continuité) s'oppose à la notion d'obstacle (discontinuité). Cette possibilité du mouvement, ou déplacement, est une fonction de l'espace physique disponible à être parcouru (visuellement ou physiquement). Cet espace monde en continuité d'accès est formé de discontinuités qui rendent lisible l'espace, forment et organisent les espaces internes en articulation avec l'environnement (comme les habitats), et définissent les circulations. Le mouvement est aussi une fonction essentielle du temps réel, continu (courant/qui s'écoule). Le temps passé (formant l'historique), ou futur (de planification), étant fondamentalement pensé et « accédé » par sauts, de façon discontinue. La notion d'événement de Gibson [Gibson 1979] caractérise un *changement* dans l'environnement comme le changement de la disposition, de la couleur ou de l'existence des surfaces.

[Acp.4] *Continuité d'alignement-ordonnancement* : La notion d'alignement réfère à notre forte capacité à percevoir les régularités. Les régularités de composition spatiale structurent notre lecture du monde et des artefacts. Par exemple, les lois de la perspective visuelle (alignements proportions) nous renseignent sur les structures et dimensions géographiques ou urbaines (cf. *invariants structurels* de Gibson); la régularité des espacements visuels entre

lettres, mots et lignes d'un texte permet à l'œil d'anticiper le saut oculaire prochain à effectuer pour se positionner sur le prochain groupe de lettre à lire et la continuité et le confort de lecture du texte. Sur le plan temporel, la perception des rythmes comme en musique nous permet de comprendre et de suivre les structures mélodiques, mais aussi de « caler », synchroniser nos actions. A l'exemple des *menus rythmiques* [Maury 1999] qui proposent d'interagir avec les menus de façon auditive et non visuelle.

[Acp.5] *Continuité de récurrence* : La notion de récurrence exprime la continuité, similitude ou répétition des structures de formes à différentes échelles. Par exemple la perception de structures arborescentes régulières des nervures d'une feuille ou les formes gigognes des *matriochkas*, poupées russes emboîtées. Cette forme multi-échelles de la continuité qui présente une relation de type « objet à l'intérieur d'un objet similaire » ou de continuité « comportementale » des structures spatiales est intéressante pour penser les propriétés graphiques et interactives de représentations zoomables ou permettant un accès continu à l'information ou au niveau de détail.

[Acp.6] *Continuité de cohérence-unité* : La notion de cohérence et d'unité semble découler des notions précédentes, comme une propriété induite ou une nécessité explicite au design de la continuité. Concernant la continuité, elle réfère à l'existence de lois générales physiques ou comportementales qui impactent les objets perçus ou manipulés. Par exemple, l'éclairage d'une scène (ou celui du soleil) impactera tous les objets présents de manière cohérente, nous permettant de percevoir les reliefs ou l'orientation de surface des objets. Il est à noter ici que des couleurs différentes produites par une variation d'orientation à la lumière d'un même matériau seront optiquement corrigées et perçues comme en continuité. De la même façon, nos perceptions visuelles, tactiles et proprioceptives concourront à l'unité perceptuelle et à l'identification d'un matériau et d'usage d'un objet. La discontinuité est pour cette acception associable à une erreur (par exemple une erreur de conception de l'objet), mais est surtout intéressante pour penser la conception de saillances visuelles comme celle des *alarmes*.

Ces différentes acceptions du concept de continuité constituent autant de dimensions qui nous permettent de caractériser la continuité présentée ou attendue entre des objets graphiques de l'interface ou d'une forme d'interaction. Ces dimensions réfèrent à un système de relations entre des objets-composants, ou parties, constitutives d'une structure qui les organise en un tout (*d'un seul tenant*). Nous avons donc cherché à analyser ces systèmes de relation à la fois par une approche ascendante (dite « bottom-up »), en observant les propriétés particulières relatives à un ensemble d'objets et produisant de la continuité, par exemple perceptuelle ; et par une approche plus holistique en s'intéressant d'abord aux « formes » de la continuité et à leurs structures, notamment à partir d'une étude des principes et pensées sur la continuité.

1.2. Principes, concepts ou propriétés de continuité : emprunts à différents champs disciplinaires

Lois, principes, règles ou propriétés, le concept de continuité est présent dans de nombreux champs disciplinaires : dans les sciences dites formelles comme les Mathématiques, dans les sciences dites naturelles comme en Physique, dans les sciences humaines comme la Psychologie. Mais aussi dans des

domaines entre sciences, arts et techniques comme l'Architecture, les Arts plastiques ou le Design.

Nous avons retranscrit et explicité ici un certain nombre de ces acceptions du concept de continuité, propres aux différents champs disciplinaires, et intéressants notre problématique IHM. Et plus spécifiquement ceux issus des domaines de la Psychologie de la perception, des Arts graphiques et de l'Architecture.

1.2.1. Concept de continuité en Mathématiques et en physique

1.2.1.1. Mathématiques : fonctions continues

Fonction continue (définition Wikipédia)

Définition : Soient I un intervalle réel,

$f : I \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction définie sur I à valeurs dans $\mathbb{R}$,

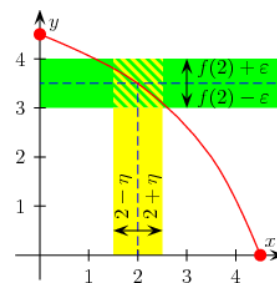
et $a \in I$

La fonction f est dite continue en a si :

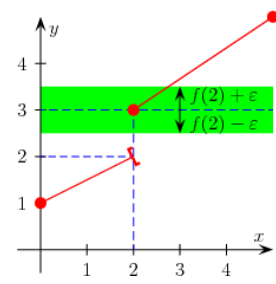
$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \eta > 0 \quad \forall x \in I \quad [|x - a| < \eta \Rightarrow |f(x) - f(a)| < \varepsilon]$$

Ainsi f est continue en a si et seulement si la limite de f en a existe (elle vaut alors nécessairement $f(a)$).

Cela veut dire que si l'on se fixe un seuil ε , on peut trouver un intervalle autour de a tel que $f(x)$ soit à une distance inférieure à ε de $f(a)$.



exemple de fonction continue sur un intervalle



exemple de fonction non continue en 2

Il faut noter ici que cette définition mathématique de la continuité de la fonction intègre une notion de seuil qui renvoie à l'étymologie latine *continuo* : faire suivre immédiatement, tenir ensemble, joindre de manière à former un tout sans interruption (dans l'espace). Ce qui pour notre problématique peut se traduire par une notion de continuité « perceptuelle » à l'exemple des animations visuelles composées d'un faible nombre d'images intermédiaires mais perçues par l'utilisateur comme continues. Une approche mathématique de la continuité doit nous permettre de poser la question d'une mesure de la continuité, notamment perceptuelle, et d'une formalisation de la notion d'intervalle visuel ou temporel. Elle pourrait aussi inversement permettre de caractériser la distance ou d'évaluer la discontinuité par exemple entre formes. Cette notion de mesure de la continuité dans les représentations est à mettre en relation avec les travaux existants en IHM comme le modèle cognitif du processeur humain de Card [Card 1986].

D'autre part, les objets géométriques qui sont utilisés par l'infographie pour être transformés en objets graphiques affichés sur l'interface sont graphiquement continus. Segments de droites, segments de Bézier, plans ou portions de plans... la succession de pixels d'un tracé antialiasé, ou la régularité de couleur, de gradient ou de texture d'une surface dessinant à l'écran des formes

graphiques, sont perceptuellement continus. Même si leur rendu pixel - matriciel - est calculé de façon discrète (rastérisation). Ici aussi la confrontation d'une mesure de variance à un indice d'intervalle perceptuel peut permettre de mieux concevoir l'identification, le style graphique ou l'unité d'appartenance d'un ensemble de formes ; ou contribuer à analyser les visuels par des méthodes de « désassemblage » graphique de l'affichage écran.

De façon plus intéressante pour notre approche du concept de continuité, la *méréologie* est une forme des mathématiques, de la logique et de la philosophie qui formalise la relation de *partie à tout*, par exemple de l'anse à la tasse ou de la télécommande à la télévision connectée ou de *l'objet x partie de l'objet y* ($x \ll y$). Le concept de la relation partie-tout entre *individus* présente des propriétés formelles élémentaires d'irréflexivité, d'asymétrie et de transitivité avec une relation d'identité permettant de définir les relations de partie propre ou impropre. Il permet de penser la relation spatiale entre pièces ou parties, ensembles et lieux [Varzi 2007]. La *méréotopologie* centrée sur la question des connexions entre parties intègre à la méréologie les notions topologiques de frontières et de relations.

1.2.1.2. Physique : discontinuité de la matière et de l'énergie ?

La physique définit et décrit le monde de façon principalement discontinue. Même si des relations continues ou des continuités existent, par exemple de l'énergie en mécanique newtonienne, il y a une discontinuité fondamentale de la matière. Les structures de la matière sont discontinues. Par exemple, il n'existe pas d'intermédiaires entre les niveaux atomiques et moléculaires. Les matériaux solides ou les fluides en mouvement, apparemment continus, sont composés d'agrégats d'éléments séparés présentant des failles, ou de molécules en écoulement. La discontinuité est une propriété caractéristique du mouvement et d'une dynamique qui procède par sauts ou par quanta. Les interactions de la lumière ou de l'électromagnétisme sont discontinues puisqu'elles sont quantiques, pourtant les particules manifestent des possibilités d'interférences, de superposition qui relèvent du continu. La mécanique ondulatoire interroge cette dualité onde-particule de la matière entre continuité et discontinuité. Du point de vue de la perception du monde « réel », la continuité (ou l'illusion de continuité) se caractérise par des sauts, failles ou ruptures, perceptuellement trop petits pour être directement observables. Ainsi, l'unité de temps est définie par Planck de façon théorique comme le temps qu'il faudrait à un photon pour parcourir une distance égale à la *longueur de Planck*, la plus petite distance mesurable. La succession des « sauts » du temps étant, de fait, trop rapide pour permettre de les distinguer un à un.

Pour le domaine des systèmes interactifs, cette notion physique de la discontinuité de la matière doit nous questionner sur la notion de matériau graphique des formes. Elle peut nous permettre de penser l'objet visuel intégré à la scène graphique, selon sa capacité à exhiber des éléments et propriétés formelles de continuité ou de discontinuité aux autres objets environnants : à la fois comme composant associable à un ensemble de formes, car partageant des régularités graphiques avec le groupement visuel. Mais aussi comme un objet ou un archétype visuel unique, de forme et d'identité remarquables, discriminable parmi tous les autres objets graphiques de l'interface.

Entre Mathématiques et Physique, les *fractales* désignent des objets dont la structure est invariante par changement d'échelle : systèmes de fonctions

itérées ou figure dont l'ensemble des points est défini par une relation de récurrence. Cette structure particulière est partiellement présente dans le monde minéral ou organique à l'exemple de la structure des arbres, des feuilles, des plumes, ou du chou *romanesco*. Le caractère *d'autosimilarité* de ces objets renvoie à la similarité de leurs formes à différentes échelles. Cette notion de récurrence structurelle ou de propriété exprimable à des niveaux multi-échelles peut présenter une approche intéressante pour penser la continuité des objets de l'interface. Par exemple pour la conception graphique de représentations zoomables permettant de naviguer de façon continue entre synthèse et détails ou pour instrumenter la continuité d'accès au contenu des structures graphiques.

1.2.2. Concepts de continuité en psychologie

1.2.2.1. Continuité de perception, d'action et de déplacement : une approche écologique

■ Continuité de perception

Depuis notre naissance, nous apprenons à interagir avec le monde physique qui nous offre un accès continu, dans l'espace et le temps.

La perception visuelle humaine est basée sur un mécanisme discret, opérée par un enchaînement de fixations oculaires discontinues reliées par des saccades ou sauts oculaires. Lors de ces fixations, nous ne voyons avec précision qu'une zone extrêmement petite – la zone fovéale – de 1 à 3 degrés d'angle visuel (qui correspond environ à la surface de l'ongle du pouce bras tendu). Au-delà de cette zone notre perception devient progressivement floue pour ne plus être sensible en vision périphérique qu'à la luminosité et au mouvement. Pour percevoir le monde, nous effectuons donc constamment des sauts oculaires, pendant lesquelles un phénomène d'éclipse visuelle réduit l'information [Levy-Schoen 1967], pour venir placer au centre de la rétine des stimuli ou parties de l'espace environnant qui nous intéresse. À partir de ces fixations, nous construisons et maintenons une image 3D précise, cohérente et continue de l'espace et de notre environnement.

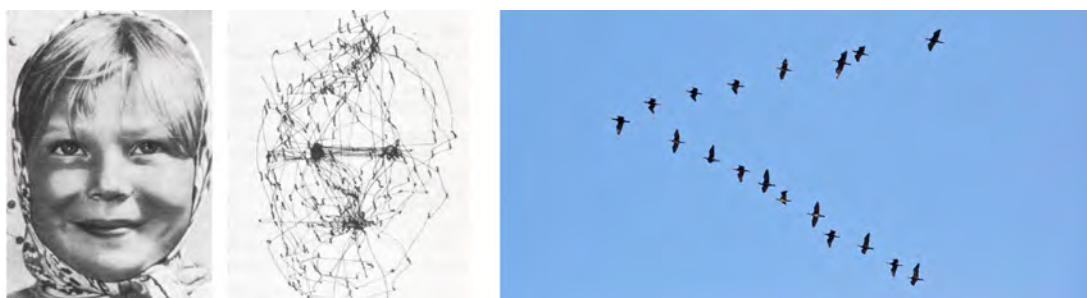


Figure 3 : Discontinuité et continuité du mécanisme de perception visuelle. À gauche, exploration oculaire d'un visage [Yarbus, 1967], à droite, suivi visuel d'un vol de grues (<http://blog.bassin-nature.com/>)

Dans ce mécanisme perceptif, nous sommes très performants pour percevoir des discontinuités, des contrastes ou des saillances visuelles (cf. Figure 3 à gauche). Ces discontinuités vont servir à nous alerter sur une zone de l'espace à regarder (par exemple nous prévenir d'un danger), mais aussi à rechercher et à identifier précisément les objets d'intérêt (cf.). Dans le même temps notre système visuel est également très performant pour reconnaître

des continuités, des régularités visuelles ou des similarités de forme, de couleur, d'organisation, de mouvement... La perception de ces continuités va nous permettre de suivre visuellement des ensembles d'objets se déplaçant de façon synchrone comme un vol d'oiseau (cf. figure 3 à droite), de situer ces objets dans l'espace et d'identifier leurs propriétés, mais surtout d'organiser cognitivement en structures de sens les objets perçus dans l'environnement. Sur le plan cognitif, nous disposons à partir de nos perceptions d'un accès progressif et continu aux détails de l'information. Par exemple, la forêt vue à distance se transforme peu à peu en s'en rapprochant — en cohérence de sens — en groupes spécifiques d'arbres, pour devenir un arbre « unique » dont on peut détailler les propriétés ou explorer les branches ou les feuilles. De plus, l'identification des formes est constante, avec un principe visuo-cognitif de constance des formes, malgré les variances de la vision de l'objet dans l'environnement : taille, position, orientation... Sur le plan de l'interaction, l'accès aux objets dans le monde physique est direct et continu (sans heurt). Pour utiliser une chaise, perçue toute proche, je n'ai pas besoin de connaître exactement ses caractéristiques ou son identité, juste d'en reconnaître l'utilisation possible, parfois très différente de l'utilisation prévue, de déduire de sa forme et par un retour continu de mes gestes comment l'attraper ou m'asseoir.

■ Continuités interactives objet-sujet : les affordances

L'approche écologique de la perception visuelle a été introduite par Gibson [Gibson 1979]. Ce dernier fonde son analyse de la perception sur les rapports entre l'animal et son milieu environnant. Selon Gibson la perception « directe » ne concerne pas que des indices visuels dits de base, comme la couleur ou l'intensité lumineuse. Des caractéristiques de l'environnement de très haut niveau sont aussi perçues « directement ». Le concept d'*affordances* [Gibson 1977], désigne ces relations entre l'homme et les objets dans l'environnement, et notamment que les possibilités d'action, sont perceptibles directement au travers ces *objets-signaux*. Des *invariants*, comme les gradients de texture des prairies, ou la simple présence de particules d'eau dans l'air créant un effet visuel de désaturation progressive de la couleur des objets, permettent aux êtres humains de situer « en profondeur » les objets se trouvant devant eux. Ainsi, l'interprétation des « données » de l'environnement est facilitée par des indices « écologiques ». C'est la coévolution de l'environnement et des espèces qui a permis cette perception directe, optimisant nos capacités (sens et organes) à percevoir de tels phénomènes. Pour Gibson, le rôle du système de perception visuelle humaine est d'extraire les informations présentes dans l'environnement qui sont utilisables par l'être humain observateur. L'observateur est dans le monde, et cette information qui lui est « utile » est « directement » disponible, sans nécessiter de représentation intermédiaire. On ne perçoit donc du monde que ce que nous pouvons faire / utiliser. Plus exactement, Gibson décrit l'*affordance* comme n'étant pas construite par les besoins du sujet/observateur, mais offerte par l'objet lui-même dont elle est une partie constitutive. La perception résulte de l'environnement écologique d'interaction dont l'objet et l'observateur font partie. Cette notion d'*affordance* a été reprise par Norman pour le design des IHM [Norman 1998]. Dans une publication plus récente [Norman 2008], il suggère aux concepteurs de préférer la notion de *signifiants*, définie comme « une sorte d'indicateur, un signal dans le monde physique ou social qui peut être utilement interprété ». Les *signifiants* sont, selon Norman, plus larges que les affordances perçues puisque pouvant être caractérisés par l'absence ou le manque.

Cette notion de propriété d'usage incluse à l'objet (une définition du design), d'*affordance* ou de *signifiant* résultant de l'interaction entre objets et utilisateur dans l'espace interactif offre un élément de continuité systémique pour l'interaction homme-machine.

■ Continuité des déplacements perceptuels et physiques

Un autre élément important pour notre problématique concerne la notion d'accès perceptuel et de déplacement continu dans l'espace physique. Pour Gibson la matière qui compose l'environnement se répartit en trois catégories : le médium, les substances et les surfaces [Gibson 1979]. Le médium est un élément continu (air, eau), sans rupture, dans lequel les déplacements (continus) sont possibles. Une caractéristique essentielle du médium est que sa transparence permet la perception (déplacements visuels, transmission des ondes sonores, des odeurs...). Les substances forment les objets. Elles peuvent varier en termes de propriétés de forme : rigidité, viscosité, plasticité ou même en transparence. L'eau est une substance particulière qui permet le déplacement, devenant ainsi médium. Leur comportement à la lumière est variable, réfléchissant une couleur pour les substances opaques ou permettant un accès visuel composite. Les surfaces correspondent aux frontières entre substances et médium. Leurs propriétés de surface (couleur, texture) dépendent des substances dont elles sont frontière. Elles sont le lieu d'interaction, action et perception, avec l'objet.

Ces trois notions qui caractérisent la matière : du *médium* qui permet le déplacement continu perceptuel et physique ; des *objets-substances* qui forment les discontinuités, mais qui peuvent aussi présenter des porosités au contexte (continuité) ; et des *surfaces* qui supportent l'accès perceptuel (vue, toucher) et l'action des utilisateurs, sont très structurantes pour les systèmes interactifs, nous y reviendrons dans ce mémoire (voir partie 4 section 4.2.2.1).

1.2.2.2. Psychologie de la forme et loi de continuité

La *psychologie de la forme*, ou Gestalt théorie proposée au début du XX^e siècle, notamment par Christian von Ehrenfels, s'intéresse aux processus de la perception comme à un tout — la « forme » — correspondant à un ensemble structuré de parties ou détails visuels. Elle propose cinq lois de la Gestalt pour une perception organisée de ces structures. La première et principale ou *loi de la bonne forme* est définie comme : « *un ensemble de parties informe (comme des groupements aléatoires de points) tend à être perçu d'abord (automatiquement) comme une forme, cette forme se veut simple, symétrique, stable, en somme une bonne forme* » [Koffka 1935].



Loi de continuité : Le système de perception visuelle humaine vise à isoler et reconnaître les objets/formes de la scène visuelle, mais surtout cherche les relations entre ces objets. La continuité intervient lorsque la vision suit un tracé continu (ligne) mais également un ensemble d'objets visuels séparés formant visuellement un alignement ou une trajectoire. Sur l'image ci-contre, d'un logotype réalisé pour l'Association des Hôtels du Canada⁸, une trajectoire visuelle est créée graphiquement par le dessin particulier de la barre centrale courbée du « H », renforcée par le vide doublant cette barre coupant les deux fûts verticaux de

⁸ Logo de l'Association des Hôtels du Canada. <http://www.hacconference.ca/>

la lettre, et terminée visuellement par le dessin de la feuille dont la tige et l'orientation poursuivent la trajectoire. Cette configuration graphique très précise produit un effet visuel de mouvement de la feuille sur la trajectoire. Les lignes visuelles pourtant statiques de cette illustration possèdent ainsi une énergie cinétique (et donc directionnelle) potentielle qui est mise en mouvement visuel par le dessin et la relation particulière d'organisation des formes. Cette loi de continuité fonctionne aussi avec des trajectoires visuelles basées sur la couleur des objets visuels, par exemple un dégradé ou une progression plus fine d'une ou plusieurs dimensions de la couleur (teinte, saturation, luminosité).

Les autres lois de la théorie Gestalt permettent de penser ou d'agir sur les relations entre formes : *lois de la proximité*, *loi de similitude*, *loi du destin commun* caractérisant comme un tout perceptuel un ensemble de parties en mouvement avec des trajectoires homogènes, ou la *loi de familiarité* (décrivant notre propension à préférer/chercher la reconnaissance de formes familières). Les designers utilisent fréquemment ces lois visuelles pour composer leurs formes, imposer le sens de lecture ou donner du sens. Nous y reviendrons dans le chapitre suivant 1.2.3.

Cette continuité de perception de *formes* concerne également la lecture des représentations mettant en œuvre des structures d'alignement, par exemple l'utilisation d'un modèle de composition par grille ou de la perspective. Plus largement, cette continuité perceptuelle sera implémentée par la création de similarités dans les propriétés des objets graphiques, par exemple avec l'utilisation de matériaux (texture), de lumières ou de styles graphiques cohérents.

1.2.2.3. Continuité perceptuelle : une image mentale partielle de l'environnement

Dans son livre *Visual Thinking*, Colin Ware [Ware 2008] pointe le paradoxe de notre perception du monde. Malgré notre sensation du maintien d'une image précise, complète et continue, constamment renouvelée de notre environnement, notre perception visuelle est reconstruite, simpliste et limitée aux besoins de nos demandes cognitives (incluant des mécanismes de protection – alarmes visuelles). Nous voyons seulement ce que nous demandons à voir du monde, dans notre champ perceptif (limité à nos capacités et focus sensoriels de l'instant), dans notre champ d'attention (limité à nos attentes perceptives), dans notre champ de pensée (limité à nos capacités de compréhension/action). Nous maintenons - mémorisons une image mentale égocentrée, continue et globale (champ perceptif et profondeur de champ), reconstruite à partir de séquences (frames) d'informations perceptives. Ces « images » perceptives sont acquises par une succession de fixations visuelles d'une zone de l'espace, positionnées à l'aide de sauts oculaires et pilotées par une suite de requêtes visuelles qui ont pour objectif de répondre à une demande cognitive. Les images mentales résultantes sont construites à partir d'une reconnaissance et identification des éléments visuels présents (plans, substances, objets, formes, matériaux, archétypes...) et d'une interprétation de la scène.

Il s'agit d'un mécanisme de vigilance, avec une continuité d'attention et d'accès perceptuel, sémantique et d'usage à l'environnement. Cette vigilance intègre en « tâche de fond » non consciente, une surveillance dans cet environnement d'informations non requises pour la tâche en cours, comme la détection périphérique de motifs perceptuels connus ou pressentis comme des signaux de

danger (l'apparition d'un obstacle, la chute d'un objet, un son qui se rapproche ou une odeur particulière). La vigilance concerne aussi la capacité à filtrer une donnée pertinente d'un percept complexe, comme la reconnaissance visuelle d'une silhouette familière ou sonore, telle la mention de notre nom dans un environnement très bruyé.

■ Les risques de la continuité perceptuelle

Néanmoins, ce mécanisme perceptif dirigé par la « demande cognitive » présente d'importantes limitations. En effet, l'information non surveillée ou non « requise » ou insuffisamment saillante risque d'être totalement non perçue, par exemple de l'opérateur d'un système de supervision. De plus, ce double mécanisme de continuité perceptuelle et de maintien d'une image mentale « en continuité » peut augmenter les risques d'erreur. Dans le processus d'activité, l'information attendue peut être perçue de façon erronée ou déformée, de par une trop forte attente perceptive issue de l'image mentale de la situation ou de l'état d'un système, notamment en situation de forte charge cognitive. Par exemple, l'alarme sonore et visuelle forte qui sera non perçue dans le cockpit par des pilotes en forte charge cognitive ou avec un fort niveau de stress qui réduit leurs capacités cognitives et produit un état de *tunnellisation mentale*. À l'inverse, dans le contrôle aérien, les risques d'incidents sont connus pour être importants en période de faible charge de trafic ou juste après une forte charge. Non seulement la vigilance diminue, et donc la fréquence de rafraîchissement de l'information, mais le contrôleur fait davantage confiance à sa propre image mentale du trafic et à son évolution attendue qu'à l'image temps réel du radar. La perception tardive d'une position non prévue, et potentiellement dangereuse, le déstabilisera et rendra son intervention très difficile. Plus généralement, pendant la lecture d'un texte, l'anticipation visuelle opérée en vision périphérique sur les mots suivants, et produisant une prévision de lecture, peut augmenter les risques de confusion et de fausse identification lors de la lecture fovéale précise de ces caractères.

■ Cécité au changement

Enfin, la nature, la taille optique (angle visuel), le niveau de contraste et de saillance, la progressivité, la temporalité... du changement visuel ont un impact sur la perception des modifications de l'environnement ou des données. Un changement lent et progressif, sans rupture visible, et présentant donc une forte « continuité » perceptuelle peut rendre ce changement non perceptible, « invisible » pour l'observateur. La notion de cécité au changement décrit ce phénomène, soit d'une habitude perceptuelle à l'évolution du contexte (à l'image de cette allégorie de la grenouille placée dans un récipient d'eau chauffée progressivement), et d'autant plus forte que ce changement n'est pas attendu cognitivement. Mais aussi d'une représentation mentale partielle de l'information. Ainsi, une modification de valeurs textuelles sur l'interface, opérée par le système avec une simple permutation d'affichage et sans animation, peut être totalement imperceptible. Ainsi, lors d'un projet européen de contrôle aérien⁹, l'ajout d'animations avait permis aux concepteurs de détecter une permutation incessante, non voulue et non perçue de l'ordre d'affichage de blocs d'informations textuelles. La similitude de composition du bloc, avec

⁹ Projet Eurocontrol PHARE Démonstration 3, auquel avait participé le CENA (Centre d'Études de la Navigation Aérienne), sur des nouveaux concepts ATM comme les trajectoires 4D ou le data-link.

des champs présentant pourtant des données de vol différentes, et la simple permutation d'ordonnement sur des positions discrètes produisaient une trop forte similitude visuelle.

Cette cécité potentielle au changement et à la modification de l'information visuelle dans notre environnement de travail est à corrélérer avec des travaux récents en psychologie de la perception qui suggèrent une forte « volatilité » des représentations visuelles. Ainsi Becker met en évidence que notre capacité de stockage et de maintien de l'information semble très limitée, « pauvre et volatile », contribuant au risque de ne pas détecter les changements et plus particulièrement dans l'information récemment traitée [Becker 2002].

1.2.3. Contraste et Harmonie, principes de continuité dans les Arts graphiques

Dans les arts graphiques ou arts plastiques comme en architecture, des principes clefs de la création, *Contraste* et *Harmonie* d'une part, *Forme* et *Espace* d'autre part, permettent de questionner le concept de continuité.

1.2.3.1. Continuité dans les représentations graphiques

■ Sémiologie graphique : caractériser les représentations graphiques

Pour la communauté IHM, les travaux du cartographe Jacques Bertin sur la sémiologie graphique [Bertin 1967] [Bertin 1975] ont été fondamentaux pour notre compréhension de l'usage des variables visuelles dans les représentations graphiques 2D. Bertin, à partir d'un large corpus d'exemples graphiques comme des diagrammes, plans ou cartes, a produit un travail de caractérisation des variables visuelles constitutives de la perception. Il a identifié sept variables visuelles qui caractérisent les *marques* (objet visuel). Ces variables sont *planaires* : position en [x, y], et *réliniennes* : la taille, la forme, la valeur (correspondant à la luminosité), l'orientation, la couleur (correspondant à l'axe de teinte), le grain (ou densité de trame). Une propriété de « *longueur* » définit l'expressivité de ces variables : c'est-à-dire le nombre de valeurs possibles pour permettre une sélection visuelle pré-attentive. Bertin a également caractérisé ces variables selon leur dimension *Nominale*, *Ordonnée* ou *Quantitative*, ou leur adéquation à présenter des données. Proposant les implications de cette caractérisation pour le design des représentations graphiques 2D, il a identifié trois niveaux de lecture : 1) la discrimination visuelle des marques ; 2) la perception des patterns et régularités ; 3) une compréhension de la représentation comme un tout, permettant d'analyser l'information émergente.

Même si ces travaux sont volontairement limités par Bertin à une approche monosémique, avec peu de notions d'interactions graphiques, et sans prise en compte des aspects sémantiques, ils nous permettent d'identifier les propriétés utilisables pour construire de la continuité ou de la discontinuité graphique. Notamment le caractère et la *longueur* d'expressivité de ces variables visuelles qui permettent de choisir la classe adaptée au besoin.

■ Arts : des théories, règles et techniques au service de la continuité graphique

Les artistes plasticiens et designers graphiques mettent en œuvre très finement les propriétés visuelles. Celles caractérisées par Bertin, mais aussi d'autres dimensions picturales plus diverses ou plus précises, par exemple

pour penser la couleur selon ses trois dimensions de teinte, saturation et luminosité, ou à partir des sept contrastes et interactions de la couleur [Itten 1961]. Ces dimensions peuvent aussi être spécifiques à l'usage de techniques, supports ou médiums particuliers. Surtout, l'approche en *totalité* des créateurs plasticiens, passe sans cesse du détail au global, du tout aux éléments plastiques. Ils ne cherchent pas à spécifier-isoler des marques visuelles simples, définitives et non ambiguës, mais plutôt à mettre fortement en interaction, par une action cumulative à l'aide de « touches » répétées, les dimensions plastiques multiples des éléments picturaux ; mêlant d'une même intentionnalité, matière, lumière, couleur, rythme et forme, pour construire des structures de relation entre éléments visuels dans l'espace de composition et de sens. Ici, la sémiologie graphique devient multidimensionnelle, le discours multisémique et le matériau graphique toujours relié et au service des dimensions émotionnelles et du message porté par l'œuvre picturale.

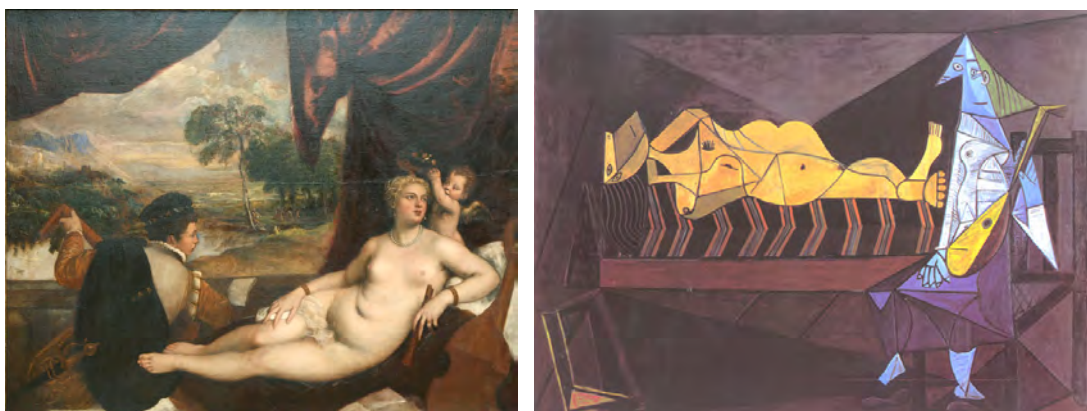


Figure 4 : *Vénus avec joueur de luth et Cupidon*, Titien 1565-70 (à gauche), *l'Aubade*, peinture de Pablo Picasso, 1942 (à droite)

La Figure 4 à droite est la reproduction d'une peinture réalisée par Pablo Picasso en 1942 : *l'Aubade* (*La sérénade ; Nu couché et musicienne assise*). Élaborée très longuement par un ensemble de dessins préparatoires, l'œuvre offre au spectateur un discours plastique volontairement paradoxal. La toile est inspirée du tableau de Titien *Vénus avec joueur de luth et Cupidon* (cf. Figure 4 à gauche) qui présente une vision classique du sujet avec un dessin aux courbes douces liant graphiquement les personnages et très adapté au discours de l'aubade.

La version de Picasso, au titre trompeur, présente une forme picturale très différente du discours visuel et de la forte harmonie picturale du tableau de Titien. Picasso met en scène graphiquement sa représentation avec une composition (horizontal vs vertical), et des espaces chromatiques (bleu vs jaune) en forte opposition entre les deux personnages, un éclairage violent entre le sombre du fond (celui d'une cellule) et la solarisation des corps, une géométrie anguleuse des formes par exemple du lit (comme un instrument de torture) et du fond venant heurter un corps boursoufflé, désarticulé et portant des cicatrices de la femme allongée... Tous ces éléments graphiques, objets et structures plastiques, concourent à produire de fortes discontinuités perceptuelles. Ces discontinuités sont mises en œuvre par l'artiste pour exprimer visuellement l'horreur du contexte de l'époque (1942) et présenter au spectateur la véritable intention de Picasso : un discours pictural sur la guerre, la prison et la torture. En Histoire de l'Art, l'analyse d'œuvre (ou méthodologie du commentaire d'œuvre) utilise cette technique de description et d'analyse formelle et stylistique, en lien avec l'étude du contexte, pour problématiser et interpréter l'intentionnalité de l'artiste.

Ces dimensions plastiques, utilisées par les artistes, sont acquises par l'étude des théories et au travers de l'expérientiel d'une pratique répétée. Elles sont employées et mises en scène dans les représentations, comme autant de moyens pour créer et hiérarchiser des jeux de ruptures et de rythmes graphiques : des discontinuités visuelles ou **contrastes** ; ou à l'opposé, pour créer des régularités graphiques, des alignements, des proportions ou des rapports particuliers et esthétiques entre des objets visuellement séparés, pour organiser l'œuvre en structures graphiques et permettre une continuité de lecture : des continuités visuelles ou **harmonies**.

Ces concepts centraux de contraste et d'harmonie, qui renvoient de façon symétrique aux concepts de discontinuité et de continuité, ont fait l'objet au travers de l'histoire de l'art, de nombreuses contributions, traités, théories, règles ou techniques. Certaines sont issues de découvertes scientifiques comme l'harmonie des couleurs basée sur les travaux de Newton (1671) concernant la décomposition de la lumière et la première formalisation du cercle chromatique [Itten 1961].

1.2.3.2. *Contraste et Harmonie : un double principe clef des Arts et de la création plastique*

Dans les arts plastiques, l'artiste met en œuvre un double principe fondateur de l'expression artistique et esthétique : *contraste* et *harmonie*.

Le principe de *Contraste* fonde l'expression visuelle : hors contraste, pas de perception. *Donner à voir c'est contraster* ! L'artiste dessine ou fait émerger des formes par un jeu subtil de tracés, de surfaces ou de plans qui sont autant de ruptures visuelles. Ruptures de luminosité ou de couleur, de forme ou de matière, de composition et de rythme, de sens et d'impression... Autant de discontinuités graphiques et formelles, précisément organisées entre elles et avec le substrat. La composition de ces contrastes par l'artiste permet de faire émerger la forme (percevoir, discriminer, identifier), mais surtout de grouper, de dissocier, de relier, de confronter, de hiérarchiser, les éléments visuels en objets de sens et de structurer la représentation et le discours de l'œuvre, même abstraite, en constante référence avec les règles de notre perception visuelle du monde physique. Par exemple, l'utilisation de la saturation pour exprimer la distance au spectateur ou des couleurs chaudes et froides pour distinguer la matérialité d'un objet visuel.

Le principe d'*Harmonie*, complémentaire de celui de contraste, permet d'organiser une lecture « globale », continue et esthétique, de ces différentes formes et ruptures visuelles. Si le contraste permet la discrimination visuelle de chacun des éléments graphiques, l'harmonie crée un modèle structurant pour la perception de l'œuvre tout entière. Elle règle à la fois le système de relation plastique et spatiale entre composants de la scène visuelle, favorisant les régularités graphiques de la composition, et permet le parcours et la lecture de l'œuvre. En ce sens, l'harmonie est un matériau explicite de la continuité perceptuelle et de lecture dans la représentation visuelle.

La Figure 5 présente une peinture de l'artiste américain Edward Hopper, un exemple de parfaite maîtrise de l'harmonie picturale. Cette harmonie s'appuie sur une composition géométrique carrée et une harmonie de quatre couleurs complémentaires légèrement désaturées et rabattues vers le blanc. Elle produit une impression unique de cohérence visuelle et d'équilibre picturale ; une

sensation de continuité spatiale et temporelle : l'expression d'un lieu « réel » (crédible), accessible à nos sens, où chaque chose est à sa place et est reliée aux autres éléments et à l'espace de cette chambre ; elle nous présente un moment, « parcourable » et « durable » d'une histoire appropriable. S'exprime ici une forte sensation de sérénité et d'humanité.



Figure 5 : *Nyak*, 1882, peinture de Edward HOPPER - New York, 1967

Le principe d'harmonie s'attache à produire cet équilibre et complétude perceptuelle des différents contrastes. Même si cet équilibre est souvent basé sur la notion de dominante (la mise en saillance d'une valeur particulière dans l'harmonie) qui permet de caractériser l'impression résultante, d'adapter le propos plastique à l'histoire racontée et à l'émotion recherchée. L'harmonie vise — ou passe par — une *satisfaction physiologique* de la réception visuelle : c'est-à-dire qu'elle cherche à « contenter » le sens perceptif (organe et sensation) du spectateur. Par exemple, l'harmonie de couleur peut être définie comme la recherche d'un équilibre spectral des couleurs utilisées, et plus précisément comme un ensemble de couleurs dont la sommation visuelle produirait un gris [Itten 1961], qui « active » et met à contribution de façon égale les différentes cellules photoréceptrices (cônes et bâtonnets) de l'œil.

L'harmonie des couleurs est l'une des théories de l'art les plus formalisées. Newton, Goethe, Chevreul, Munsell... ont progressivement construit notre compréhension des mécanismes de l'harmonie colorée, principalement basée sur la notion de couleurs complémentaires du cercle chromatique. Des travaux récents comme ceux de Lyons et Moretti [Lyons 2004] [Lyons 2005] ou [Tabard 2009] ont intégré ces apports au domaine de l'interaction homme-machine. Ils ont proposé une formalisation des harmonies colorées de l'interface basée sur l'usage de *molécules* ou de structures harmoniques possiblement complexes. Ces molécules positionnées géométriquement dans le cercle chromatique par des systèmes normalisés de la couleur¹⁰, permettent des interactions de transformations continues et la création d'harmonies de couleurs dans les interfaces numériques.

¹⁰ Les modèles normalisés de la couleur ont été définis par la Commission Internationale de l'éclairage (CIE). La CIE a ainsi formalisé des espaces colorimétriques basés sur le système XYZ, tel que les espaces CIE LAB, CIE LUV, CIE LCH

1.2.3.3. Continuité visuelle, continuité de sens



Figure 6 : Utilisation graphique du principe de continuité Gestalt pour une création publicitaire « Gourmet » de Friskies (Lowe Lintas Amsterdam).

La Figure 6 présente l'accroche visuelle d'une publicité pour la marque « Gourmet ». Le designer graphique a mis en œuvre de façon explicite des propriétés de la perception visuelle humaine pour garantir la transmission du message souhaité de la campagne publicitaire. Ici, il a appuyé son propos sur le principe Gestalt de continuité [Koffka 1935]. L'image présentée, avec cette continuité de forme, affirme et « prouve » au lecteur que le pâté pour chat « Gourmet » qu'il va acheter est bien constitué d'une tranche naturelle de chair découpée directement au « cœur » du poisson frais. L'usage des couleurs (harmonie complémentaire bleu-orangé) et le fond aérien bleuté renforcent la sensation de légèreté, de fraîcheur de la composition *naturelle* du produit. L'intérêt de ces techniques visuelles est qu'elles permettent d'exprimer très fortement des sens ou des mobiles d'achat qui ne sont pas toujours dicibles de façon explicite. Par exemple, de jouer sur des sentiments de culpabilité, de jalousie, de luxure... Le mécanisme visuel mis en jeu étant perçu, même inconsciemment, et utilisé par la cognition et dans l'action « impulsive » de l'acte d'achat.

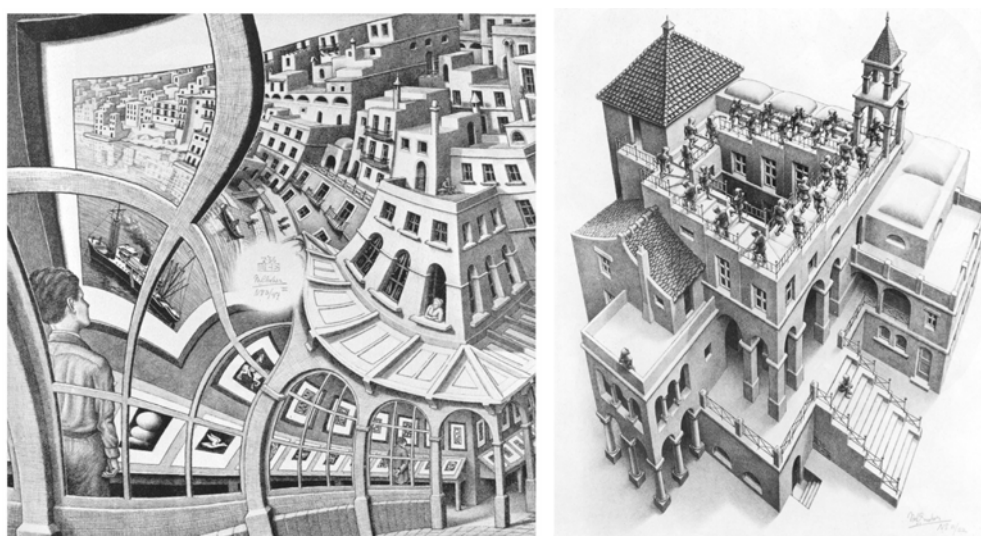


Figure 7 : Deux gravures de M.C. Escher : « *Exposition d'estampes* », 1956 (à gauche), « *Montée et descente* », 1960, ou comment agir sur la représentation pour suggérer une continuité spatiale ou temporelle (à droite)

La Figure 7 présente deux gravures réalisées par l'artiste néerlandais Maurits Cornelis Escher. Ces œuvres illustrent la capacité de l'artiste à agir sur la représentation perspective pour modifier la continuité spatiale ou temporelle perçue. La gravure de gauche, « *Exposition d'estampes* », réalisée en 1956,

utilise une déformation géométrique de la grille perspective, en spirale, pour représenter une continuité paradoxale de la scène et inclure le spectateur à l'œuvre exposée. Le dessin peut être parcouru, de façon continue, pour passer du spectateur au bateau représenté sur l'estampe exposée, remonter d'élément en élément sur le port puis sur la ville jusqu'à l'observateur « miroir » à la fenêtre au-dessus des toits, pour redescendre le long de la galerie d'exposition pour suivre la succession d'estampes jusqu'au spectateur initial, vu ici au travers des fenêtres et intégré dans le monde continu du tableau. Dans la gravure de droite, « Montée et descente » (la ronde des prisonniers) de 1960, un simple déplacement des repères de la perspective conique, appelée sur-perspective, permet de représenter des prisonniers effectuant une ronde sans fin, et montant ou descendant de façon continue les marches d'un escalier infini.

Dans ces deux œuvres, l'artiste n'imité pas le monde, mais rend lisible un sens paradoxal. Précurseur du courant surréaliste, il joue sur l'usage de représentations essentiellement figuratives et réalistes, mais transforme cette réalité par une compréhension des mécanismes de la perception visuelle, à l'aide de techniques géométriques de projection. Dans ces deux exemples, c'est la continuité de parcours visuel de l'espace et des formes représentées — comme le regard remonte la file des prisonniers le long de l'escalier pour revenir encore et toujours à son point de départ — qui construit l'image mentale paradoxale et une sensation de continuité infinie, impossible dans le monde physique.

1.2.3.4. Composition graphique et continuité de lecture

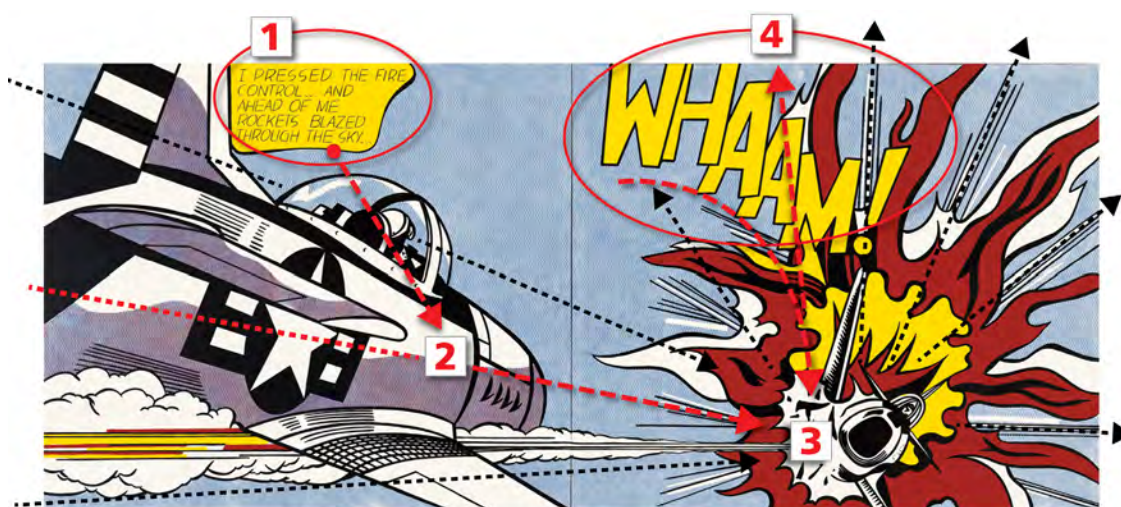


Figure 8 : « *Whaam* » peinture de Roy Lichtenstein (1963) inspirée de vignettes d'une bande dessinée, illustre la construction graphique d'une continuité temporelle dans une image statique (composition annotée par nos soins).

Whaam est une œuvre de l'artiste américain Roy Lichtenstein, l'une des plus célèbres du mouvement Pop Art. Inspirée d'une bande dessinée de 1962 de la revue *All-American Comics* (cf. Figure 8). Cette peinture illustre un des principes de la composition graphique utilisant les continuités visuelles pour permettre de renforcer la lecture temporelle d'une image statique. Dans ce tableau, les couleurs (par exemple le jaune des zones de saillance de l'information), les contrastes, la composition (perspective, convergence des lignes) et les rythmes graphiques... imposent le sens et l'ordre de lecture de l'image. Ce parcours visuel est dirigé vers la zone de saillance (en jaune) de la bulle textuelle située en haut et au quart gauche de l'image, où est formulée l'intention de tirer du pilote (1) ; de

ce point, le spectateur est amené à descendre verticalement (comme une suite du texte) sur le cockpit et sur l'avion dont les lignes de fuite exagérées de la perspective (2) conduisent le regard sur la trace fumante (surlignée de jaune) du départ de la roquette ; en suivant cette ligne visuelle, il aboutit au point de saillance visual constitué par l'avion ennemi au centre de l'explosion (3) (cerclée de jaune) ; explosion qui se développe et le conduit jusqu'au rendu graphique (graphème) du son de l'explosion WHAAM (4) (texte en jaune). En Art et arts graphiques, ces techniques de composition sont largement formalisées, enseignées et utilisées depuis de nombreux siècles, pour permettre au designer de construire plastiquement le discours de sens de la représentation et spécifier le parcours visuel de l'image par le spectateur.

En IHM, des travaux récents comme [Conversy 2011], proposent de décrire de façon formelle ce mécanisme de codage graphique (par exemple à l'aide de la sémiologie graphique) d'un processus continu de lecture ou *scanning* des informations visuelles.

1.2.4. Motion design et continuité temporelle

Détecter et interpréter le mouvement est l'une des capacités les plus importantes de notre système de perception visuelle. Pour la vision, l'identification séquentielle de percepts visuellement similaires à des positions différentes, est perçue comme le mouvement d'un objet unique. Des artefacts visuels, même distants, se déplaçant de façon homogène sont perçus comme formant une entité unique (principe de la Gestalt). À l'inverse, une permutation rapide entre deux objets visuellement proches ou sémantiquement identiques peut ne pas être perçue par les utilisateurs (voir 1.2.2.3 - cécité au changement).

1.2.4.1. Représentation visuelle statique et perception continue du temps

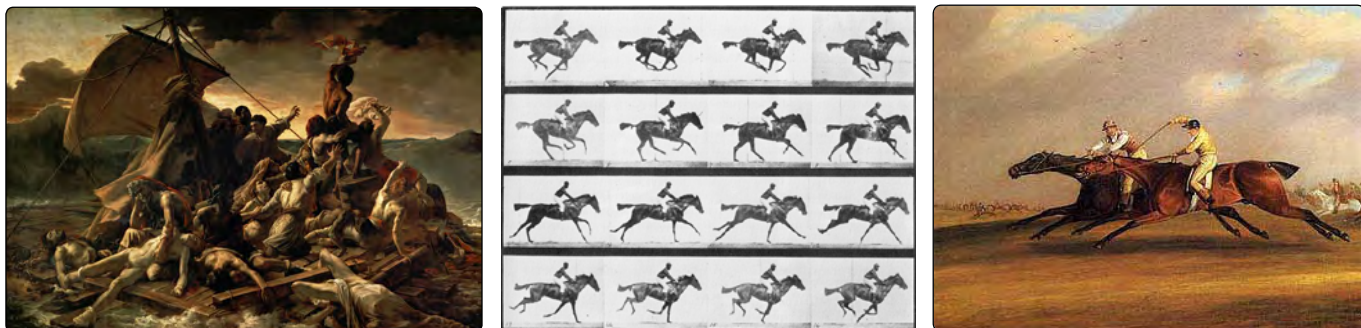


Figure 9 : Expression visuelle du temps : *Le radeau de la Méduse*, peinture de Théodore Géricault, 1819 (à gauche), *Cheval au galop*, 1872, chronophotographie réalisée par Eadweard Muybridge (au centre), *Trafalgar et Météorite*, peinture de Samuel Alken, 1806 (à droite)

Dans l'histoire de l'art et des représentations visuelles, la représentation graphique du temps est restée très longtemps (et par obligation) statique. Il s'agissait pour les artistes de suggérer sur une image figée des événements qui se déroulaient dans le temps ou des situations dynamiques mettant en scène des êtres vivants en action (par exemple des scènes de bataille), ou des contextes en mouvement (par exemple une tempête). La Figure 9 présente trois représentations visuelles du temps.

À gauche, la peinture de Théodore Géricault *le radeau de la Méduse*, réalisée entre 1818 et 1819, illustre une scène de naufrage. La composition du tableau

et le travail pictural restituent de façon statique un grand nombre d'informations temporelles qui seront perçues par le spectateur de l'œuvre. Sont à la fois lisibles, le déroulement temporel de l'événement : le long temps (13 jours) passé à dériver et l'extrême lassitude des naufragés, le moment où le radeau semble sur le point de sombrer dans une mer agitée, les cadavres (en bas à gauche) pour lesquels le temps s'est arrêté, l'instant précis où un survivant au centre aperçoit le bateau qui va les secourir, et enfin au tiers droit en haut du tableau est figuré l'espoir d'avenir (et le temps futur du sauvetage) avec la représentation d'un homme jeune agitant une étoffe pour appeler les secours. D'autre part, les techniques picturales utilisées (composition, touches, lumière, couleurs...) participent à l'expression de cette rythmique du temps, de la fluidité des éléments (mer et nuages) aux mouvements des survivants et du groupe humain tendu en pyramide vers l'espoir du sauvetage, ou a contrario à l'immobilité (temps arrêté) des cadavres. Tous ces codages graphiques qui utilisent des effets de continuités et de discontinuités visuelles dans l'espace caractérisent des dimensions et propriétés de continuité temporelle.

La Figure 9 au centre présente une chronophotographie réalisée par Muybridge en 1872, qui permet, pour la première fois, de décomposer le mouvement du cheval au galop. Cette décomposition du mouvement n'avait pas été découverte auparavant par les peintres ou les observateurs.

Sur cette même figure à droite, une peinture de Samuel Alken, peintre anglais de la fin XVIII^e - début XIX^e siècle, représente une course de chevaux. Dans cette œuvre, pourtant postérieure à la chronophotographie de Muybridge, le peintre n'a pas choisi de représenter le galop des chevaux en s'inspirant des images « réelles » enregistrées par Muybridge. Il a préféré peindre une position morphologiquement impossible, avec les quatre membres des chevaux en extension, qui représente mieux visuellement la dynamique et la temporalité de la course qu'aucune des images de séquence de la chronophotographie [Gombrich 2001]. Il faut noter ici l'intérêt de la caricature, du « faux plus vrai que le vrai », dans les représentations ou le design graphique, notamment pour les animations de séquences.

1.2.4.2. Image animée et animations graphiques

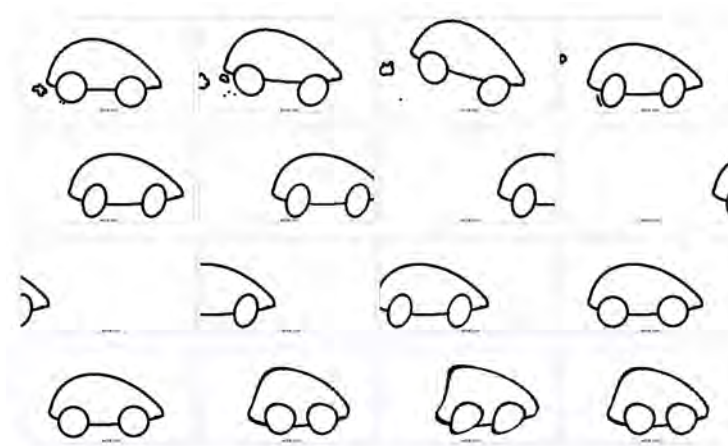


Figure 10 : Fichier GIF animé, par ARTIE.com, présentant en 42 images le déplacement d'une voiture. Le démarrage et le freinage sont fortement caricaturés (déformation graphique) pour renforcer l'effet visuel.

La Figure 10 présente une séquence simple d'animation, réalisée par Artie.com sous la forme d'un fichier GIF animé avec 42 images internes. Le dessin

des images du démarrage et de l'arrêt a été volontairement caricaturé, imitant les images symboliques des comics : avertissement visuel annonçant le mouvement, soulèvement exagéré du démarrage, disparition hors champ du véhicule à gauche et réapparition par la droite, enfin déformation en forme d'écrasement au freinage avant l'arrêt. À noter la forme des roues renforçant la dynamique des mouvements. La séquence se termine sur une position proche de la position initiale, ce qui permet de rejouer en boucle la séquence. Ici aussi, comme sur l'exemple du tableau de Samuel Alken, la simplification et l'exagération sont plus importantes que le réalisme. Contrairement aux images statiques suggérant la continuité temporelle, la représentation animée est dans sa forme et perceptuellement continue. La dimension rythmique de l'animation permet de contrôler et d'exprimer des formes de continuité et de discontinuité temporelles dans la séquence. Comme le principe de *slow in slow out* d'accélération au démarrage et de décélération en fin d'animation. Dans les techniques d'animation, ces principes comme les douze principes d'animation du dessin animé [Frank 1997] s'inspirent des lois de la physique et de la perception visuelle pour permettre de créer des animations plus « réalistes ».

■ Animations graphiques dans les IHM

Les animations graphiques sont très présentes dans les IHM. Elles sont une partie constitutive de la représentation, permettant d'exprimer la nature et le comportement de composants, par exemple de signifier à l'utilisateur l'interaction possible. Dans DigiStrips [Mertz 2000] [CENA 2001], elles constituaient l'un des quatre concepts d'une interface *naturelle* (écran tactile, gestes, design graphique, animations). Elles étaient notamment utilisées pour déplacer naturellement et de façon synchrone les strips du tableau pendant des interactions gestuelles continues (changement du geste possible au cours de l'interaction) ; augmenter visuellement les feedforwards et le feedback des actions ; et renforcer la conscience mutuelle des actions entre contrôleurs.

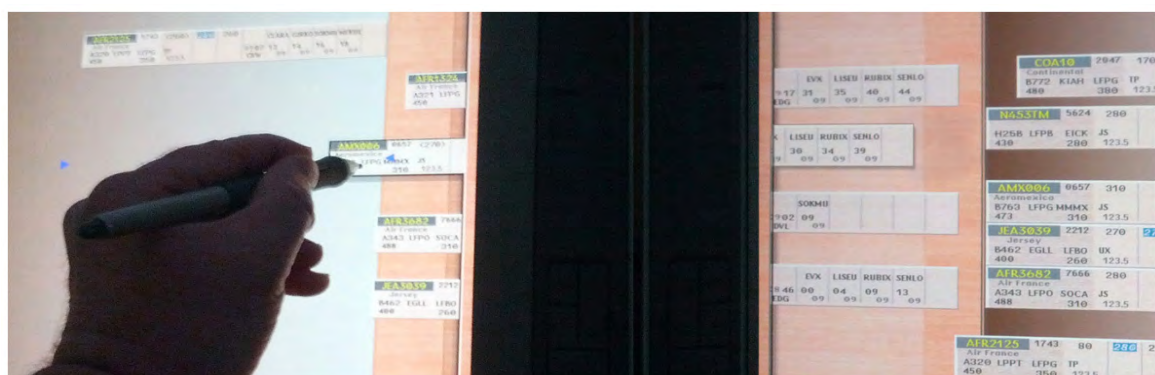


Figure 11 : Animations graphiques dans DigiStrips : animation synchrone d'un même objet entre deux écrans (à gauche), feedback animé d'une sélection de clearance avec un nouveau niveau de vol (à droite).

Par exemple l'animation de fin de sélection d'une valeur de niveau (cf. Figure 11 à droite) était accompagnée par une transition visuelle de l'objet réifié (valeur de menu sélectionnée) vers la zone de destination sur le strip. L'animation se terminait par un effet de rayure animée de l'ancienne valeur, accompagné du déplacement vertical des informations déjà saisies, et le remplacement avec une mise en saillance par la nouvelle valeur. DigiStrips permettait des animations synchrones entre systèmes et processus d'affichage séparés comme l'animation d'objets situés « entre » deux écrans (cf. Figure 11 à gauche).

1.2.4.3. Motion Graphics Design



Figure 12 : Motion design, création de Christopher Lee

La Figure 12 présente une séquence de motion design, créée par le designer Christopher Lee. Le *Motion Graphic Design* ou *Motion Design* est une séquence animée d'éléments graphiques, images, graphismes 2D ou 3D, typographies, souvent synchronisés avec une bande-son. La différence essentielle avec l'animation réside dans le caractère dynamique du motion design, dont l'effet graphique est par exemple dynamiquement généré en fonction de l'action de l'utilisateur ou par un moteur aléatoire de génération de forme. Le motion design est aujourd'hui largement utilisé pour les écrans, la télévision par exemple pour les génériques, les bandeaux de titrages ou d'ajout d'informations dynamiques comme pour le sport, les jeux télévisés, ou encore pour augmenter l'image vidéo avec des éléments virtuels ou des effets, à l'exemple de l'ajout d'effets 2D sur les images 3D des jeux vidéo. Il est de plus en plus présent dans les spots publicitaires, sur le WEB, pour la réalisation des écrans d'accueil ou pour les sites d'e-commerce. Il est déjà utilisé pour les menus ou pour des effets système sur les dispositifs mobiles.

La technique du Motion Design s'est généralisée ces dernières années avec l'avènement de logiciels dédiés de « compositing » comme *After Effects* d'Adobe. Contrairement à l'animation des composants logiciels, *After Effects* est basé sur un traitement logiciel orienté image, comme *PhotoShop*, avec un système d'empilement de calques animables sur le temps et des formes graphiques libres qui lui permettent de s'affranchir des limites de structures d'objets plus géométriques et hiérarchisés et de leurs espaces contraints de transformation.

En IHM, des travaux s'inspirant du motion design, comme [Lee 2002] [Lee 2006] ont proposé des techniques et des usages des formes cinétiques, notamment typographiques, pour leur capacité à diriger l'attention visuelle, enrichir l'information ou transmettre des émotions.

1.2.5. Formes et espaces : Principes de continuité en Architecture et Urbanisme

1.2.5.1. Dispositif spatial et continuité d'accès des espaces architecturaux

L'architecture d'Art ou de Bâtiment, c'est la construction d'un ensemble de structures ou édifices, organisant l'espace en *dispositif spatial* pour répondre à des usages (habitat). Ce dispositif spatial organise l'espace physique interne et externe (« *entourement* ») en espace architectural, matérialisant des limites : tracés, discontinuités, élévations, englobements, mais surtout articulant des relations de passage, ouvertures et circulations. En créant ces limites et passages, l'architecte compose des discontinuités et continuités d'accès (de déplacement au sens médium-substances de Gibson) perceptuels et physiques aux espaces fonctionnels de la structure spatiale.

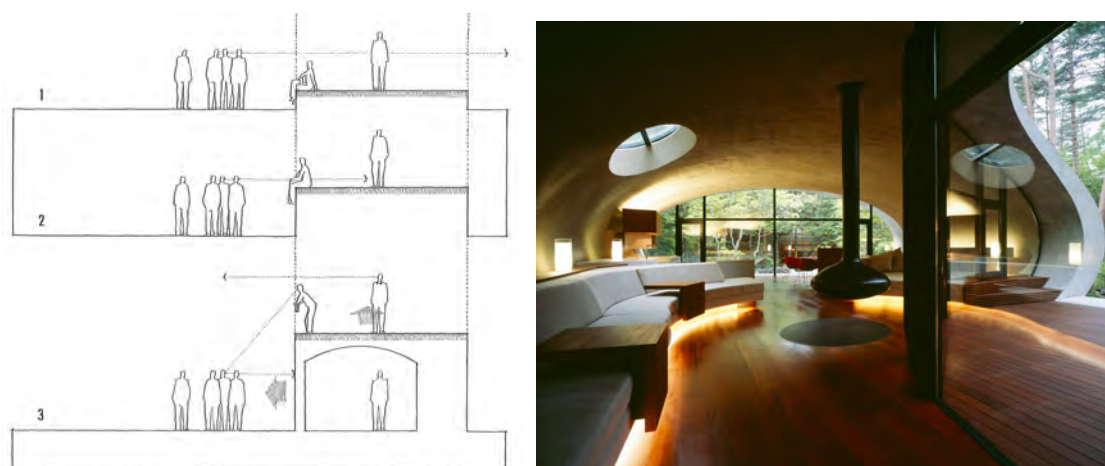


Figure 13 : Continuité d'accès : dessin de Ching illustrant le principe de l'accès perceptif en fonction du niveau d'élévation (à gauche), continuité des espaces et ouvertures vers l'extérieur, Concrete Shell Villa (Japon) cabinet d'architecte ARTechnic (à droite)

La Figure 13 présente deux illustrations de ce principe de continuité d'accès perceptuel et physique aux espaces (ouvertures, circulation) et de continuité de l'espace architectural à l'entournement. Le dessin à gauche, extrait du livre d'introduction aux éléments architecturaux de Francis Ching « Architecture: Form, Space & Order » [Ching 2007], présente l'impact de la création d'élévations sur l'accès visuel et sur la continuité des espaces. Le plan « bas » d'élévation de la vue (1) maintient un accès total et symétrique, perceptuel et de déplacement, pour l'ensemble des personnes présentes ; le plan en « terrasse », d'élévation moyenne (2) n'autorise plus la circulation et contraint fortement l'accès perceptuel, le plan d'élévation « haute » correspondant à la hauteur d'un étage (3) est asymétrique, n'autorisant l'accès visuel que pour la position balcon. L'image à droite est une photo prise de l'intérieur d'une architecture d'habitat contemporaine, *Concrete shell villa*, située près de Nagano au Japon, et créée par le cabinet d'architecte ARTechnic. Le dispositif spatial est conçu à partir de formes courbes rappelant les coquillages. Cette coque de béton forme une enveloppe continue qui s'enroule du sol au plafond et sur elle-même, protégeant des espaces intérieurs continus avec un parquet qui se prolonge en terrasses extérieures. La construction très largement ouverte sur l'extérieur s'intègre à la forêt qui l'entoure. Cette double continuité du projet architectural, qui vise à la fois à garantir l'accès aux espaces pour les habitants, et à adapter/intégrer la forme architecturale à l'environnement (culturel, social, topographique, climatique...) est représentative des principes de design de l'architecture contemporaine.

1.2.5.2. Harmonie de composition et continuité d'usage des espaces architecturaux

L'architecture conçoit l'habitat à partir de son usage humain. Elle utilise des modèles biomécaniques et morphométriques, pour standardiser un ensemble de métriques et normes de construction de l'habitat favorisant l'accessibilité, l'activité et la circulation des hommes au sein des édifices.

Cette conception fonctionnaliste de l'architecture issue du Bauhaus permet de mettre en œuvre un système global de proportions pour penser et instrumenter l'harmonie. Le Corbusier conçoit ainsi en 1943 un système de mesures harmoniques en accord avec la stature humaine [Le Corbusier 1943]. Il définit une grille de mesures et de proportions le Modulor (cf. Figure 14), s'appuyant

sur la notion de « Nombre d'Or ». Cette grille est très largement utilisée en architecture. Elle donnera naissance à la notion de gabarits de composition utilisés par les designers graphiques (PAO, édition, Web, IHM).

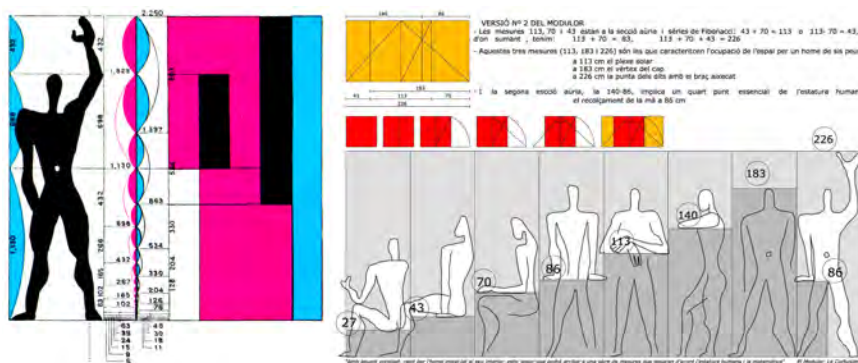


Figure 14 : Le modulator, un système de mesure harmonique pour l'architecture conçu par Le Corbusier (1943), métriques humaines basées sur le nombre d'or (à gauche), application aux formes architecturales (à droite).

Le modulator est un modèle harmonique qui présente un exemple de mise en œuvre du principe de continuité. La conception basée sur l'usage du nombre d'or expose une récurrence multi-échelle des unités de mesure (cf. Figure 14 à gauche), à l'image des fractales (voir 1.2.1.2.). Plus important, la Figure 14 à droite présente l'usage de ce système harmonique pour la conception d'habitat normalisé. Cette normalisation par exemple de la dimension des éléments architecturaux permet aux habitants d'utiliser de façon continue les espaces qui sont adaptés à leur morphologie et à leurs occupations posturales de l'espace.

1.2.5.3. Continuité modèle-programme : du modèle formel à la construction de l'édifice

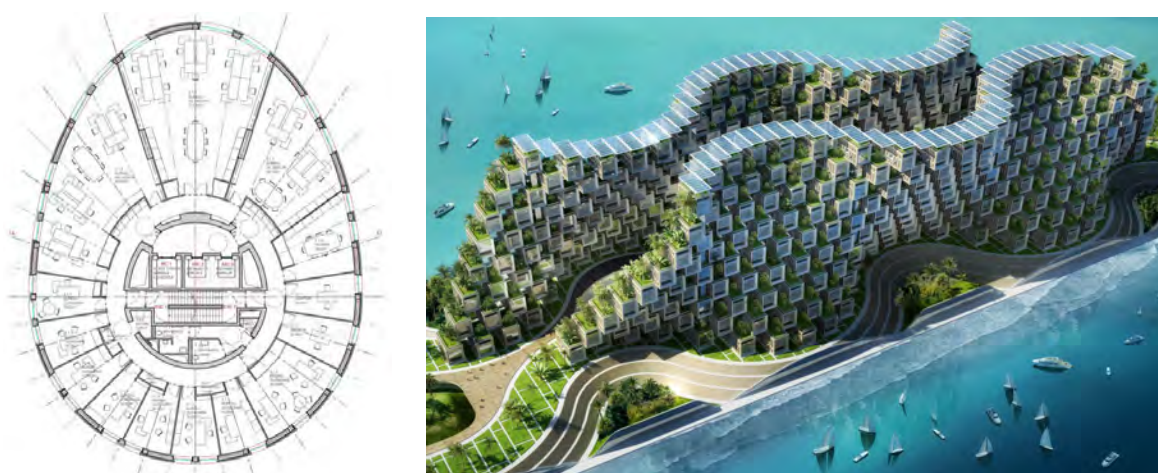


Figure 15 : Deux modèles formels architecturaux : plan d'un étage de bureau de la « Tour bleue » de Charleroi par l'architecte Jean Nouvel (à gauche), projet Coral Reef de l'architecte Vincent Callebaut (à droite)

La Figure 15 présente deux modèles formels de projets architecturaux. L'image de gauche est un plan des étages de bureaux de la future Tour bleue, de l'hôtel de police de Charleroi (Belgique). Le plan est un élément central de la conception architecturale permettant une représentation très précise, directrice de la construction, du modèle conceptuel formel de l'architecture. Ce plan montre comment une pensée globale de la forme (gestalt), ici basée sur

une double courbe plane (ovoïde externe et cercle interne), modélise la continuité architecturale et définit la géométrie des composants internes (bureaux, circulations) dans le but d'offrir un support à l'activité. La Figure 15 à droite est une illustration de principe du projet *Coral Reef* de construction d'un *village vert* en Haïti, conçu par l'architecte belge Vincent Callebaut. Ce modèle formel s'inspire de la forme organique d'un récif corallien pour composer des cellules d'habitat le long de deux trajectoires curvilignes. Cette composition de nombreuses formes régulières parallélipédiques est basée sur leur mise en relation à des trajectoires linéaires de type « *datum* » [Ching 2007].

1.2.5.4. Continuité de représentation des espaces urbains

L'urbaniste et architecte Kevin Lynch a été l'un des premiers chercheurs à s'intéresser à la perception de l'espace urbain et à analyser les représentations mentales des villes en termes d'images avec des critères tels que la lisibilité, l'orientation ou la mémorisation [Lynch 60]. Il crée le concept d'« *imagibilité* » des formes urbaines, ou leur capacité à faciliter la création d'images mentales partagées. Une forte *imagibilité* permet à l'utilisateur (habitant) de percevoir la ville comme une structure fortement continue, comme « *un enchaînement d'objets distinctifs entretenant des relations claires* ». Pour Lynch, la forme physique de la ville permet la production d'une image à travers cinq types d'éléments fondamentaux : les voies ou *paths* (rues, trottoirs, sentiers, lignes de transport) qui structurent la géométrie de l'espace et l'organisation du mouvement, les limites ou *edges* (rives, tranchées, murs) qui forment des ruptures et organisent des sous-espaces urbains, les nœuds ou *nodes* (jonctions de voies ou de modes de transport, certaines places), les points de repères ou *landmarks* (bâtiment remarquable ou monument, élément géologique ou végétal) et les quartiers ou *districts*, zones formées ou identifiées par des caractéristiques internes propres, typologie architecturale, caractéristiques sociales, spécialisations fonctionnelles, et permettant la sensation d'entrer, d'être ou de sortir d'un espace « homogène ».

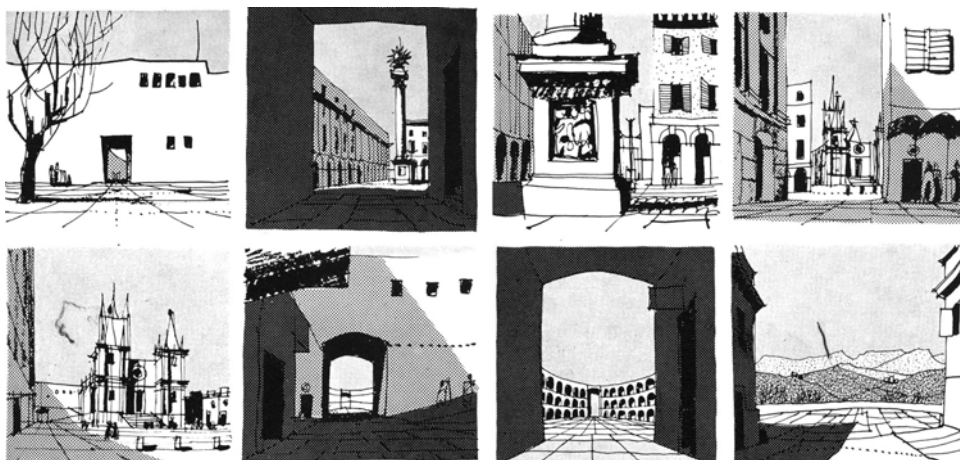


Figure 16 : Séquence de dessins illustrant la vision sérielle d'un observateur traversant une ville, extrait du livre *The concise townscape* [Cullen 1961]

Dans son livre « *The concise townscape* » [Cullen 1961], l'architecte et urbaniste Thomas Gordon Cullen définit la continuité comme « *un moyen simple de montrer comment un type d'espace est directement lié à un autre par les éléments physiques* ». Il propose le paradigme d'un observateur en mouvement comme élément de base de la perception de l'espace construit, et de construction de l'image mentale du paysage urbain. Cette construction est réalisée

à partir d'une vision sérielle de points de vue prélevés par l'observateur au cours de son cheminement (cf. Figure 16). Cullen définit ainsi la notion de *serial vision* comme un instrument conceptuel pour la lecture de la ville.

Concernant le concept de *continuité*, ces notions d'imagibilité et de lisibilité des structures d'espace et de vision sérielle d'éléments parcourus, décrivent la relation duale forme-détails entre une structure globale (et image mentale) en continuité et des éléments ou point de vue en discontinuité.

1.2.5.5. Continuité forme-contexte de l'architecture adaptative

La notion de *morphologie architecturale* correspond à une adaptation réciproque, ou adéquation, de deux entités : la forme, « idéale » et tendant vers la régularité, et son contexte, complexe et hétérogène [Alexander 1971]. L'architecture est vivante, elle se conçoit et s'inscrit dans un existant. Elle est modifiée avec le temps, par l'habitat, l'évolution des usages et par la circulation des hommes, à l'exemple des sentiers créés et entretenus par les passages successifs.

L'architecture adaptative met explicitement en œuvre un potentiel d'adaptation physique des structures architecturales au contexte et à l'environnement : conditions climatiques, de vent, de terrain ou d'orientation au soleil ; aux aspects sociaux ou d'usage, comme le nombre de personnes présentes dans une pièce. L'architecture adaptative se veut en *interaction sensible* avec ses habitants, par exemple en leur permettant de changer de façon contrôlée l'opacité d'un mur-fenêtre ou la couleur d'un matériau intelligent. L'Institut de Monde Arabe à Paris, réalisé par l'architecte Jean Nouvel en 1989, est l'un des premiers ouvrages importants mettant en œuvre le concept d'architecture adaptative [Fessy 1995]. La façade sud du bâtiment est composée de plus de 30.000 diaphragmes photosensibles, assemblés en panneaux réguliers rappelant les murs ajourés des *moucharabiehs* orientaux (cf. Figure 17). Cette structure de verre et d'acier, entre mosaïque et mécanisme d'horlogerie, est gérée par un système informatique qui analyse le contexte lumineux pour adapter en continu l'ouverture des diaphragmes et l'éclairage des espaces internes du bâtiment à la lumière externe et à la position du soleil.

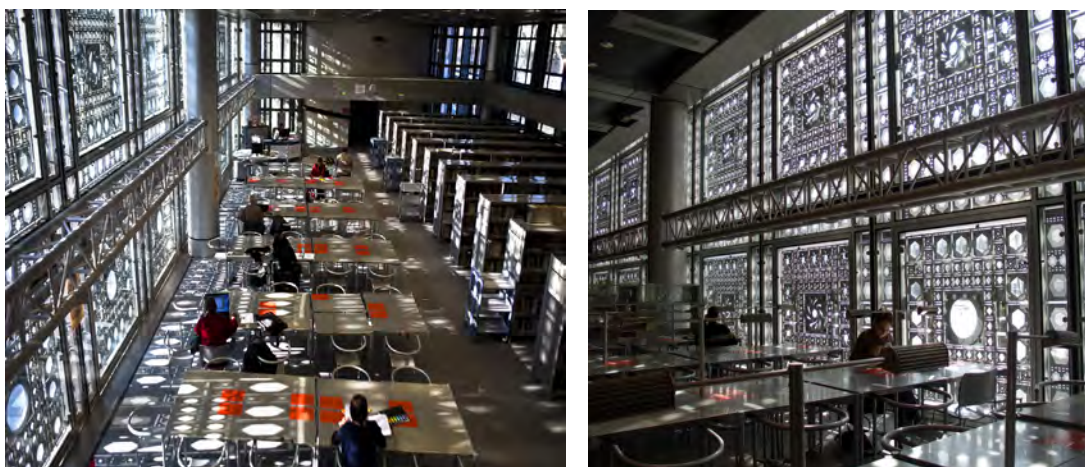


Figure 17 : Architecture adaptative au contexte lumineux de la façade sud de l'Institut du Monde Arabe à Paris, architecte Jean Nouvel, 1989.

L'architecture adaptative est un champ de recherche multidisciplinaire rassemblant des domaines tels que l'architecture, l'urbanisme, les sciences sociales, l'ingénierie et l'informatique ou les Arts [Schnädelbach 2010]. Cette

recherche aujourd'hui très active, concerne notamment les structures transformables, les matériaux intelligents et *bio-inspirés*, l'éco-construction et l'adaptation écologique (énergétique, climatique) des bâtiments et des espaces urbains, ou l'intégration des dimensions physiques et virtuelles de l'habitat avec la notion d'*espace public hybride* pour la conception d'espaces architecturaux continus entre physique et numérique [Cingolani 2010].

1.2.6. Synthèse et principes de continuité et de discontinuité

■ Une variété des approches et des usages

Ce voyage conceptuel de la notion de continuité à travers les champs disciplinaires montre une variété importante des approches et des usages.

La discontinuité est définie par la Physique comme un fondement de la matière, d'un monde « réel » fait de ruptures, de failles et de sauts, mais qui peut, néanmoins, présenter un aspect continu pour notre perception. Pour les domaines des arts graphiques et de l'architecture, la discontinuité est l'essence de la création des formes « élémentaires » du langage plastique. La mise en œuvre de ces formes permet de donner corps, d'organiser et de structurer l'espace visuel et physique comme l'édification des formes en architecture qui crée le dispositif spatial et en articule les espaces. Cette discontinuité renvoie à des dimensions d'usage de la forme, notions d'obstacle et de rupture présentées par les substances et surfaces, principe de contraste et de saillance perceptuelle et physique des objets, propriétés de discrimination et d'identification inscrites dans l'objet, de délimitation et d'isolement des espaces internes en espaces fonctionnels.

La continuité est décrite comme une préférence du système perceptuel simplifiant notre lecture du monde. Elle associe et met en relation des ensembles d'objets visuels ou *parties* pour présenter et permettre la manipulation d'un *tout d'un seul tenant*. Elle caractérise l'appartenance et la cohérence perceptuelle et de sens de formes même distantes. L'approche écologique de la perception (Gibson) définit une continuité homme-milieu avec une perception *directe* et une interaction *constitutive* entre sujet et objets dans l'environnement. Pour l'Art, la continuité organise, facilite et dirige les processus de lecture et la construction de sens. La continuité est constitutive du principe d'harmonie. Elle règle les rapports esthétiques, l'équilibre des compositions et l'habitabilité des formes et des espaces architecturaux. La continuité du *dispositif spatial* assure l'adéquation entre modèle formel, plan et construction, entre édifice et environnement, ainsi que la continuité des espaces et des circulations des espaces internes, d'*habitat* et avec l'espace externe, d'*englobement*. Elle permet l'adaptation *organique* au contexte des formes architecturales. Elle rend possible la perception de l'espace construit et la construction d'une image mentale partagée de l'espace urbain.

■ Des dimensions pour le design d'un concept de continuité pour l'IHM

Au travers cette phase d'analyse initiale et à partir d'une approche multidisciplinaire, nous avons pu identifier un ensemble de six dimensions pour le design d'un concept de continuité pour l'interaction Homme-Machine :

[D.1] *Continuité identité-appartenance.*

[D.2] *Continuité de liaison-inséparabilité.*

[D.3] *Continuité de mouvement-déplacement.*

[D.4] *Continuité d'alignement-ordonnancement.*

[D.5] *Continuité de récurrence.*

[D.6] *Continuité de cohérence-unité.*

1.3. Continuité et discontinuité dans les systèmes interactifs : élaboration d'un concept

À partir de ces définitions et emprunts « externes » du concept de continuité, nous pouvons questionner les besoins des systèmes interactifs et formuler une problématique de recherche pour l'interaction homme-machine.

1.3.1. Questionnements

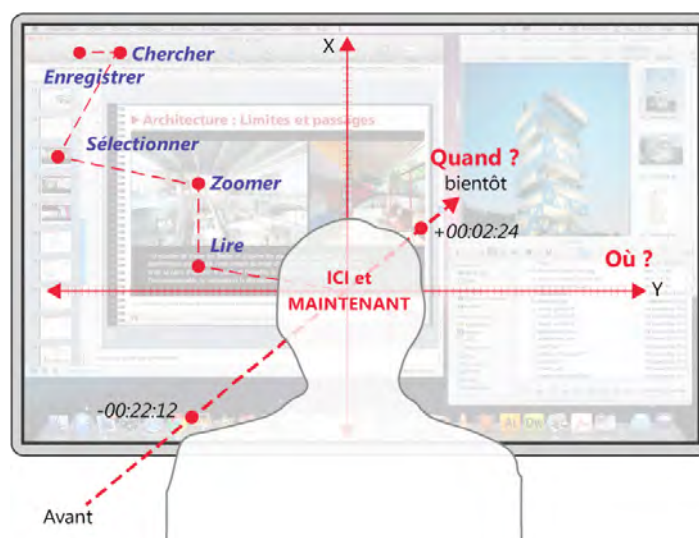


Figure 18 : Pour mener des activités complexes, l'utilisateur est contraint de sans cesse parcourir visuellement l'interface graphique et d'effectuer des incessants basculements entre ressources, outils et fenêtres applicatives

L'espace d'interaction *se dispose autour* de nous comme un environnement à la fois physique et numérique, dont nous sommes le « *centre mobile* » (cf. Figure 18). Dans les systèmes interactifs (ordinateurs personnels, smartphones) que nous utilisons quotidiennement, nous devons sans cesse parcourir cet environnement pour réaliser des tâches très différentes et manipuler des informations toujours plus nombreuses à l'aide de multiples ressources et outils logiciels. L'organisation de cet espace numérique d'interaction, au travers de l'interface graphique utilisateur présente de fortes discontinuités (voir section 4.1.2). Ces discontinuités sont issues des choix et principes d'architecture logicielle et de conception de l'interface, par exemple le système de gestion en *fenêtres* des applications du Windows Manager, avec un principe de *séparation* logicielle, mais aussi graphique des processus à l'exécution. Ces principes contribuent à la robustesse du système (ex. protection contre les erreurs) et impliquent de bonnes propriétés pour l'utilisabilité des interfaces, notamment pour la réalisation séquentielle des tâches. À l'inverse, ces discontinuités structurelles entre des « lieux » visuels et interactifs dédiés segmentent fortement l'usage conjoint de ressources multiples — pourtant aujourd'hui prépondérant — et augmentent la *viscosité* de l'interface.

L'homogénéité et la généricité des représentations graphiques constituent un autre concept fondateur des interfaces graphiques utilisateur (GUI). Par exemple, les principes d'abstraction visuelle et de cohérence graphique du style des composants système (widgets) ou de la réification graphique des données, actions ou fonctions. Ces objets graphiques de l'interface, typés en classes d'objets graphiques et affichés habituellement sous forme de listes, présentent le plus souvent des formes visuelles très similaires, perceptuellement peu discriminables. À l'image de la représentation des fichiers dans le gestionnaire de fichiers qui associe une icône représentant le type de fichier (représentation de classe) et un label textuel de nommage du fichier. Ces représentations visuellement « uniformes » entre éléments, et fortement statiques dans le temps, n'aident pas l'utilisateur à chercher ou identifier un élément particulier, ni à percevoir les actions précédemment effectuées ou à faire avec ces éléments. Ce mode de représentation manque de discontinuités graphiques, de ruptures visuelles qui permettent une meilleure particularisation et saillance visuelle des objets d'intérêt pour la tâche en cours et renforcent la continuité de l'interaction.

“L’habitation est une relation entre l’espace et le temps. Le temps est un créateur et un destructeur d’espace. L’espace n’est pas indépendant et statique. L’espace est contrôlé par le temps.”

Cette parole de l'artiste Mario Merz (1925-2003) illustre bien un « paradoxe » des interfaces graphiques utilisateur. En effet, cette interface numérique qui se propose d'être un lieu central pour supporter des activités multiples et des tâches suivies dans le temps, présente une apparence et un comportement de l'espace très différents de celui du monde physique. Dans cet espace numérique, les représentations sont essentiellement symboliques, abstraites et intangibles. L'objet de représentation d'une instance de données unique n'est pas un élément visuel unique (différenciable) et l'action particulière ou les usages répétés de/sur ces objets ou de/avec leurs contenus ne changeront ni la nature de cet objet ni sa forme perçue. Les actions, d'arrangement par exemple, n'ont pas d'influence non plus sur l'espace environnant, son organisation ou son parcours (voir 1.2.5). Cet aspect temporel d'une transformation progressive (*organique*) des objets et par là de l'espace lui-même est pourtant fondamental pour l'usage et l'*habitat* humain [Borie 2006]. Dans l'interface numérique, la simple composition explicite de fenêtres sur l'écran n'est pas « enregistrable » par l'utilisateur pour une utilisation ultérieure. Les données ou ressources même fréquemment utilisées, sont listées et rendues de façon monotone sur l'interface et s'ouvrent dans l'application comme si c'était à chaque fois un « recommencement ».

1.3.2. Définition d'une problématique de recherche

1.3.2.1. Une problématique pour l'interaction homme-machine

Les différentes approches de la continuité identifiées à travers différents champs disciplinaires, notamment dans les domaines de la perception visuelle, des arts graphiques et de l'architecture, nous semblent particulièrement pertinentes pour répondre aux nouveaux besoins de l'interface graphique et de l'interaction homme-machine. L'émergence de ces nouveaux besoins étant selon nous caractérisée par le nombre croissant des informations accessibles

sur l'interface et par une complexification de l'usage des dispositifs interactifs. Comme l'utilisation conjointe ou alternative par l'utilisateur de données, outils et applications multiples pour conduire ses activités.

Nous faisons donc l'hypothèse que le **concept de Continuité**, à travers de ses deux aspects consubstantiels de continuité et de discontinuité peut constituer un outil théorique et d'instrumentation, particulièrement adapté pour supporter la conception de l'interface graphique utilisateur des systèmes interactifs. Ce concept doit nous permettre de penser et concevoir les propriétés des objets et des espaces de l'interface à partir des systèmes de relation qu'ils entretiennent avec des structures et ensembles de sens, de composition et d'interaction. Un tel modèle de conception se doit d'externaliser autant que possible ces dimensions pour donner à l'utilisateur la possibilité de contrôler ces systèmes de relation.

Nous postulons que le développement d'un tel concept de continuité : peut participer à une approche plus intégrative de l'interaction, au sein d'un dispositif spatial numérique et physique (à l'image de l'architecture de bâtiment) , comme un *habitat interactif* qui organise les informations complexes dans l'espace perceptuel et d'interaction selon les dimensions temporelles des usages qui y sont localisés ; et permette ainsi la poursuite d'activités complexes.

1.3.2.2. *Un processus de recherche*

Nous proposons donc d'étudier la pertinence de ce concept de continuité dans le cadre de l'interaction homme-machine. Notre travail veut s'attacher tout d'abord à la continuité des représentations visuelles et des relations qu'elle rend explicites et accessibles, de et entre les espaces, structures, composants et objets graphiques de l'interface. Plus largement, nous nous intéressons à la continuité de l'espace interactif lui-même, continuité perceptuelle et de l'interaction, spatiale et temporelle, et entre mondes physique et numérique. Nous voulons enfin explorer plus précisément les apports potentiels du concept de continuité pour l'architecture graphique du GUI (Graphical User Interface) des systèmes interactifs complexes.

Nous nous donnons ainsi pour objectifs : d'analyser les problèmes relatifs au concept dans les systèmes interactifs actuels ; d'identifier les besoins ; de relever les travaux de recherche de l'interaction homme-machine que nous pouvons associer à ce concept de continuité ; de concevoir et d'implémenter des espaces de solution mettant en œuvre le concept de continuité ; d'évaluer autant que possible l'utilité, la performance et la capacité de ce concept à satisfaire l'expérience utilisateur (UX).

1.3.2.3. *Des apports attendus*

Les apports attendus de ce processus de recherche sont tout d'abord et essentiellement académiques. En termes de résultats, nous nous sommes fixé des objectifs prospectifs pour la formulation et l'exploration du concept dans le champ de l'interaction homme machine. Nous proposons ainsi dans un premier temps d'embarquer (d'apporter vers l'interaction) des principes et techniques issus d'autres domaines pour les confronter et les adapter à l'IHM, ceci est en soi un apport. Nous apporterons ensuite, au travers de projets et contextes d'applications concrets, des éléments d'analyse des besoins, d'identification de dimensions et principes de design, et de techniques mettant en œuvre des propriétés de continuité et de discontinuité. Nous privilégions des

projets d'exploration se situant à des niveaux d'échelle très différents de l'espace interactif, des composants de forme basiques (niveau micro), aux espaces d'interaction (niveau macro) puis au niveau de l'architecture graphique (niveau méta), pour mieux adresser en classes d'exemples les apports attendus.

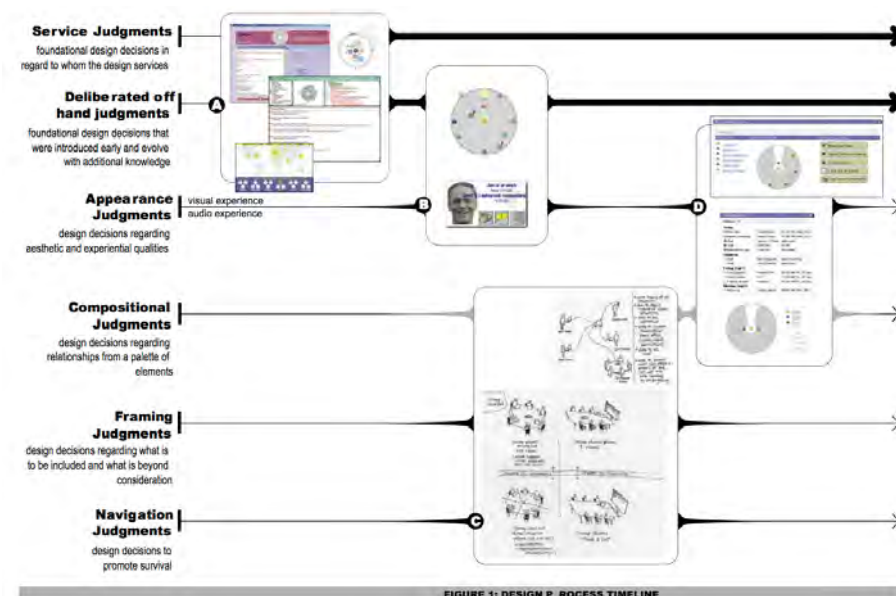


Figure 19 : Design Praxis : Design jugements, figure extraite de l'article
Dispelling Design as the 'Black Art' of CHI [Vetting Wolf 2006]

D'autre part, nous défendons l'idée que l'approche transdisciplinaire menée dans le cadre de cette recherche ainsi que les formes de l'exploration du concept constituent un apport en soi de la conduite du design dans l'interaction homme machine. Cette question du design est l'objet d'un débat dans la communauté IHM. Ainsi Vetting Wolf dans « *Dispelling «design» as the black art of CHI* » propose une approche plus créative du design IHM à l'exemple du *creative design* des designers [Vetting Wolf 2006]. Cette approche, orientée *praxis* (au sens de centrée sur l'action), allie une rigueur du design et une pratique fondée sur quatre principes ou qualités : un processus non linéaire de l'intention et de l'exploration de design, une notion de *jugements de design* (voir Figure 19), la création d'artefacts de design et d'un processus réflexif basé sur la notion de critique, traditionnelle aux métiers de l'art et du design.

1.4. Trois explorations du concept de continuité pour les systèmes interactifs

L'émergence et la conduite de cette problématique de recherche n'ont ainsi pas été linéaires. Le concept de continuité n'a pas été défini *ab initio*, comme un objet d'étude préalablement et précisément appréhendé et délimité. Au contraire, il est le fruit d'un parcours multiforme et itératif de réflexions, d'explorations et de découvertes, menées à partir de demandes et de projets industriels et de recherche, mais aussi d'attentes plus personnelles issues de « rencontres » culturelles et disciplinaires propres à mon cheminement. Au cours de ce travail de recherche, trois projets très différents, de par leur thématique, forme, dimension, durée ou degré d'achèvement, mais en cela très complémentaires, m'ont permis de conduire une exploration et des mises en œuvre diversifiées du concept de continuité pour supporter la conception de systèmes interactifs.

1.4.1. Exploration 1 : élaborer un système de formes favorisant la lisibilité comme matériau graphique pour l'interface

La première exploration résulte d'une demande industrielle, formulée par le département EDYDN (Facteurs Humains) de la société Airbus, ayant abouti à une coopération de recherche entre Airbus et le Pôle R&D de la DSNA/DTI¹¹. Le projet *Aeronautical Font*, objet de cette demande, avait pour objectif la conception et le développement d'un composant logiciel : une police de caractères, composée d'un ensemble de fontes numériques conçues pour l'affichage des informations textuelles sur les interfaces cockpit des futurs programmes avions, devant garantir la lisibilité des informations, même en contexte d'usage dégradé. Ce projet dont j'ai assuré la coordination, contribué de façon importante à l'ensemble des phases, et réalisé une majeure partie du travail, est aujourd'hui terminé. Il a abouti à la réalisation industrielle et à la livraison de huit typographies numériques spécifiquement adaptées aux interfaces cockpit et aux systèmes interactifs critiques de l'aéronautique. Il a également fait l'objet d'une publication à la conférence CHI 2012 [Vinot 2012].

Ce projet m'a permis d'explorer les apports du concept de continuité — avec son corollaire, consubstantiel, de discontinuité — pour la conception et la validation d'un système de formes favorisant la lisibilité : lisibilité-discrimination et identification visuelle de chacun des signes typographiques, à l'aide d'un principe de discontinuité ; lisibilité-compréhension et confort de lecture du texte, par une mise en œuvre du principe de continuité. La conception d'un tel système graphique intègre l'étude et la spécification de propriétés, métriques et instructions logicielles embarquées, particulières aux composants typographiques. Ces propriétés et métriques permettent au système graphique de composer ces formes « atomiques » en structures visuelles régulières et de garantir l'utilisabilité et la continuité de lecture des informations textuelles. Une généralisation des concepts, méthodes et techniques développées dans le cadre de ce projet nous permet de penser plus largement les besoins de conception, de composition et de structuration d'ensembles d'objets graphiques « élémentaires » pour l'interface. Elle doit contribuer à proposer le concept de continuité pour supporter la création de *matériaux graphiques* adaptés pour la conception et la « construction » des systèmes interactifs.

1.4.2. Exploration 2 : penser la cohérence et la continuité des espaces interactifs mixtes entre physique et numérique

La deuxième exploration s'appuie sur le projet Strip'TIC, mené au sein du laboratoire LII de l'ENAC en collaboration avec la DSNA/DTI. Strip'TIC est un projet de recherche ayant pour but la conception, pour et avec les contrôleurs aériens, d'un espace interactif tangible basé sur l'usage de strips papier « connectés ». Il a abouti à la réalisation d'une plate-forme multimodale de contrôle aérien, mêlant espaces et objets d'interaction physiques et numériques, strips papier et tableau de strips, image radar, projections d'informations augmentées et tags de réalité augmentée, stylo numérique et interaction multitouch.

¹¹ Direction Technique et de l'Innovation de la Direction des Services de la Navigation Aérienne (DGAC)

Ce projet collectif, auquel j'ai contribué, a fait l'objet d'un travail de recherche important, de plus de trois années, qui a donné lieu à de nombreuses présentations et à plusieurs publications scientifiques [Hurter 2012][Letondal 2013][Vinot 2014].

Dans le cadre de cette thèse, le projet Strip'TIC a servi de terrain pour explorer plus avant le concept de continuité, dans les systèmes interactifs mixtes et tangibles, entre dimensions physique et numérique. Cette exploration en largeur du concept a traité notamment des problématiques de complexité et de cohérence — de l'espace de travail, des représentations, des interactions — pour la conception d'espaces interactifs tangibles augmentés. Plus spécifiquement, nous avons étudié la continuité d'interaction au sein d'un dispositif interactif multisurfaces, ou entre objets et substrats ; la continuité perceptuelle de représentations composites fusionnant supports matériels et impressions physiques et lumineuses ; et la problématique de continuité de l'activité, notamment temporelle, supportée par les possibilités d'externalisations cognitives et de programmation de l'action offertes par le dispositif. Ce cadre d'expérimentation très riche des espaces mixtes nous permet de discuter de façon plus large et plus prospective du concept de continuité et de ses apports pour le design des espaces interactifs.

1.4.3. Exploration 3 : promouvoir le concept de continuité pour revisiter l'architecture graphique de l'interface des systèmes interactifs complexes

Enfin, la troisième exploration, plus ouverte, concerne l'architecture graphique des interfaces graphiques utilisateurs (GUI). Contrairement aux deux premières, elle n'a pas pour origine un projet concret, pour un domaine d'application, une activité, une demande ou des besoins très spécifiques, ni une démarche thématique et collective de recherche. Cette exploration est à la fois transversale à des préoccupations et thèmes de recherche personnels, et résultante d'un avancement dans cette démarche de thèse qui profite d'une phase d'analyse initiale et des deux premières explorations du concept. Elle est aussi la « résurgence » d'une confrontation plus ancienne entre design et informatique, d'un enrichissement mutuel d'apports et de connexions entre des champs de connaissances, méthodes ou outils issus de chacune des deux disciplines. Elle reflète aussi des questionnements voire des « frustrations » à ne pas trouver toujours de correspondances dans les espaces et outils numériques, avec certaines approches et qualités plastiques, d'usage et d'habitabilité, mises en œuvre aujourd'hui par des métiers d'art comme l'architecture ou le design.

Cette exploration vise à engager une réflexion sur l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes interactifs. Nous avons analysé les principes et modèles actuels qui conditionnent l'organisation graphique et interactive du GUI, pour en reconsidérer les problèmes potentiels et les besoins en contexte d'activité complexe ou d'usage coopératif de multiples applications et ressources. Plus précisément, nous avons exploré le concept de continuité à travers celui des limites et des passages dans et entre les structures graphiques : ouvertures et circulation entre contenants, espaces, fenêtres ou vues ; relations et transitions entre contenus, groupes, objets ou représentations. Nous avons ainsi interrogé l'apport des notions de discontinuité et de

continuité pour les espaces interactifs, non pas comme une opposition, mais comme une double dimension, nécessaire, consubstantielle et interactive, de l'espace de design des GUI. Cette exploration a eu pour but d'expérimenter et d'évaluer les rôles et potentialités du concept de continuité pour supporter la conception des interfaces graphiques. Et plus largement, de revisiter à l'aide de ce concept les matériaux, formes et espaces des entités et structures visuelles pour penser l'architecture graphique des futurs « *habitats interactifs* ».

Aeronautical Fonts: concept de continuité et design de composants textuels adaptés aux contextes critiques

« Je ne peux pas concevoir le tout sans concevoir les parties et je ne peux pas concevoir les parties sans concevoir le tout. »

Citation attribuée à Pascal citée par Edgar Morin [Morin 1990]

Cette première exploration du concept de continuité s'intéresse aux objets et formes graphiques élémentaires de l'interface et à leur mise en relation dans des systèmes de formes organisés. Les formes textuelles mises en œuvre dans l'interface à l'aide des composants logiciels des polices de caractères numériques constituent des jeux de formes graphiques très structurés. Ces *fontes*¹ sont des structures graphiques qui mettent en œuvre des propriétés locales à chaque forme ou *caractère*¹, par exemple permettant d'ajuster le rendu à la grille de rendu pixels, mais aussi globales pour permettre la composition de ces formes en texte (espacements, alignements, etc.). Elles sont, en ce sens, particulièrement intéressantes pour penser le concept de continuité.

Les interfaces graphiques des systèmes interactifs sont encore très majoritairement basées sur l'affichage d'éléments textuels. Affichage de contenus « texte » dans les applications grand public et professionnelles : bureautique, messagerie, Web, supervision, base de données, outil métier... Mais aussi affichage de composants d'interface intégrant du texte, comme l'énoncé textuel des labels de widgets (bouton, menu...) ou l'identification textuelle (nommage) des fichiers et répertoires dans le gestionnaire de fichier du système. D'autre part, la lecture de texte affiché sur écran pose des problèmes spécifiques de lisibilité [Dillon 92], notamment dus aux technologies de rendu et aux paramètres physiques d'affichage et de composition du texte sur l'écran [Chandler 01] [Dyson 2004]. Les impacts plus complexes des propriétés typographiques de l'interface sur l'activité, par exemple sur la compréhension du texte ou sur le support de la lecture en contexte critique ou dégradé, ont été peu évalués. Le design et la mise en œuvre de typographies numériques adaptées aux différents usages restent un enjeu essentiel pour garantir l'utilisabilité des systèmes interactifs.

Les polices de caractères numériques sont des composants logiciels (fichiers fonte) qui intègrent à la fois la spécification graphique des caractères ou *signes typographiques*¹, avec les formes vectorielles de leur(s) contour(s) et des instructions additionnelles optimisant le rendu à l'écran (*rastérisation*) à une résolution pixel voulue (*hinting*¹) ; ils intègrent aussi un ensemble

1 Pour les termes typographiques, un glossaire situé en annexe de ce mémoire présente une définition d'une sélection partielle de la terminologie du domaine.

de règles et propriétés par exemple d'alignement, de tables et métriques, qui permettent de composer les caractères en textes : tables de nommages, métriques d'espacements, de *kerning*¹ (approche entre paires de caractères spécifiques)... [Haralambous 07]. Ces codages et instructions graphiques sont mis en œuvre par le moteur de rendu de texte du système ou par l'interface de programmation graphique (ex. OpenGL), pour produire une image rastérisée (bitmap) du texte à afficher. Ce mécanisme de production des affichages textuels, associant composants logiciels typographiques et moteurs de rendu, présente la particularité de ne rendre accessible à l'utilisateur final qu'une partie seulement des attributs typographiques, qui correspond à des propriétés de haut niveau : texte à afficher, taille ou couleur des caractères, justification du paragraphe... Les propriétés précises du dessin de la lettre ou de la composition des caractères (ex. espacements, alignements...) restant généralement « protégées » afin de garantir la qualité graphique, la lisibilité et le confort de lecture. En ce sens, les typographies numériques constituent un véritable « matériau » textuel — car dotées de propriétés et de fonctionnalités intrinsèques — pour le design des interfaces graphiques.

De nombreuses typographies numériques ont été développées pour les usages standard de l'environnement bureautique ou plus spécifiquement pour certains dispositifs interactifs comme les mobiles (ex. Smartphones). Ce sont généralement des adaptations numériques de typographies classiques, mais aussi, et de plus en plus des créations spécifiques adaptées à l'affichage sur écran. Ces dernières ont été conçues pour garantir la lisibilité du texte numérique, même pour des faibles résolutions d'affichage, comme la police Verdana créée en 1996 par Matthew Carter et Tom Rickner pour Microsoft [Verdana]. Cependant, peu de travaux ont été menés pour des contextes d'usage plus particuliers ou pour une lecture en contexte fortement dégradé.

Continuité et Discontinuité : un principe clef du design typographique et de la lisibilité graphique

Le terme français de lisibilité correspond en anglais à deux termes : «legibility», associé à l'écriture, et «readability», associé au livre². Le premier terme mesure la facilité de discrimination et d'identification visuelles d'un caractère parmi d'autres, avec des critères tels que le temps de recherche ou le nombre d'erreurs. Le deuxième réfère à la commodité de lecture en continu et à la compréhension d'un texte, critère mesurable par exemple par la vitesse de lecture et l'évaluation de la compréhension du texte lu ou de la fatigue visuelle générée. Ces deux exigences de lisibilité d'un texte sont au cœur de la création typographique.

La **lisibilité-identification** (*legibility*) de chaque caractère est garantie par la création d'une signature visuelle unique du glyphe³ (image réalisée) de la lettre, permettant la discrimination visuelle avec les autres signes, et par l'organisation d'une rupture avec les caractères précédents ou suivants de la chaîne de texte. Il s'agit ici de créer de la **discontinuité perceptive** : segmentation spatiale (vide, rupture) entre caractères, contraste de forme entre

2 Définition *Le Robert et Collins*, 5^e édition 2001.

3 À l'opposé du caractère typographique qui correspond à une forme archétypale de la lettre (modèle), le glyphe est la représentation graphique particulière (instance) de ce caractère pour une fonte donnée, mais aussi sa "trace" imprimée ou affichée sur l'écran (voir glossaire typographique).

lettres ou symboles et accentuation de la saillance des éléments discriminants de la lettre (ex. jambages), pour favoriser une anticipation de la lecture en vision périphérique.

La **lisibilité-compréhension** (*readability*) est au contraire obtenue par la réalisation et l'organisation de régularités visuelles (structurelles) entre les caractères permettant de parcourir facilement le texte, et de passer visuellement d'une lettre, d'un mot ou d'une ligne à l'autre. Il s'agit ici de créer de la **continuité de lecture** : régularité de tracé (cohérence d'outil, angle d'écriture, contraste), gabarit et classes de forme des primitives et de famille de lettres, ligatures, régularité de composition et alignements, régularité des espacements et des *contreformes*, corrections optiques...

Ce double principe de continuité et de discontinuité graphique a été utilisé comme un concept central dans le cadre de ce travail de recherche, avec pour but la conception et l'évaluation expérimentale de fontes numériques pour les interfaces du cockpit. Nous avons pu mesurer ainsi l'efficacité de ce concept pour construire et valider des solutions logicielles qui répondent à un haut niveau d'efficacité (usages en contexte fortement dégradé), mais aussi de sécurité opérationnelle (systèmes critiques).

2.1. Contexte industriel et de recherche

2.1.1. Contexte du projet et objectifs industriels

Dans le cadre d'une coopération de recherche entre Airbus et la DSNA (Direction des Services de la Navigation Aérienne), le Département EDYDN d'Airbus (Human Factors) a fait la demande auprès du Domaine Recherche et Développement de la DSNA/DTI, d'un travail de recherche et d'expertise visant la conception, l'évaluation et la validation opérationnelle d'une police de caractères numérique destinée aux interfaces du cockpit.

Cette demande de coopération de recherche a abouti à l'identification d'un projet commun de recherche Airbus/DSNA : « Definition & Validation of an Aeronautical Font ». Ce projet a débuté début 2010 et s'est terminé début 2013.

Pour Airbus, l'objectif industriel était de :

“Define, assess and validate on real equipment, a character font with variants. This font character must be usable with high level of efficiency under aeronautical conditions: brightness, ambient lighting, distances and angles and on different screen technologies (existing and future ones).”

L'objectif du projet de recherche était donc l'étude et la fourniture d'un composant logiciel : une police de caractères composée d'un ensemble de fontes numériques permettant la mise en œuvre efficace, efficiente et sûre des informations textuelles sur les écrans des cockpits de futurs programmes aéronautiques. Cette police a vocation à être utilisée pour l'ensemble des systèmes et dispositifs de l'avion : écrans du cockpit pour les systèmes CDS⁴

4 Concernant les termes et sigles aéronautiques et des systèmes cockpit, un glossaire aéronautique situé en annexe de ce mémoire regroupe les termes utilisés.

(avionique), OIS (information), OMS (maintenance), et écran cabine pour le FAP (panel de contrôle).

Un document Airbus de référence (cahier des charges) précise la demande, le phasage et les échéances du projet ainsi que les livrables attendus. Une phase de validation très importante, en contexte de laboratoire puis en contexte opérationnel avec des équipages commerciaux (pilotes) est requise. Un document « Use of Design », destiné aux concepteurs IHM des futurs systèmes devra leur permettre de choisir les fontes adaptées aux besoins des activités ciblées et de guider la mise en œuvre dans les interfaces.

2.1.2. Contexte de recherche et implication

Pour la DSNA, j'ai coordonné le projet et été plus spécifiquement en charge de l'analyse du besoin, de l'analyse technique de l'existant, de l'état de l'art typographique, de la conception et de la création typographique. Une chercheuse en Psychologie expérimentale, Sylvie Athènes, spécialiste des questions de lecture et d'écriture, a été recrutée pour m'assister pour la partie psychologie de la perception de la phase d'analyse (observations, état de l'art lecture) et surtout pour conduire la partie expérimentale, menée de manière itérative dès la phase de conception. Une entreprise spécialisée dans le design graphique IHM, Intactile Design, a permis de finaliser le développement requis du jeu étendu de caractères et de l'ensemble des fontes numériques.

Par-delà les intérêts industriels et de valorisation de ce type de recherche, l'intérêt de ce travail recherche pour l'IHM est de deux ordres :

- Le contexte d'application très spécifique du cockpit, notamment les conditions d'usage en contexte dégradé et les impératifs absolus de sécurité (life-critical, certification), impose une phase d'analyse initiale importante (analyse des besoins et de l'existant, états de l'art techniques et scientifiques), des méthodes de conception innovantes, basées sur l'expérimentation et une performance particulièrement importante des composants logiciels réalisés.
- La durée du projet et les moyens techniques et financiers importants mis à disposition ont permis un travail de recherche conséquent, jamais encore réalisé pour une conception typographique dans ce contexte d'activité.

Concernant le concept de continuité, les contraintes spécifiques à l'activité et les qualités attendues d'utilisabilité des composants ont permis d'explorer en profondeur les apports du concept pour la conception de « jeux » de formes graphiques embarquant des propriétés perceptuelles et de composition. La forte composante expérimentale des processus de conception et de validation apportant des résultats et des enseignements utiles à l'évaluation du concept de continuité. Une publication à CHI 2012 (article long) a présenté les apports de ce travail de recherche pour l'interaction homme machine [Vinot 2012].

2.2. Analyse initiale

La nature de la demande et le contexte critique de l'activité nous ont imposé une phase initiale importante d'analyse de l'activité de l'existant et des besoins. Pour conduire la phase d'analyse initiale du projet trois classes de méthodes ont été mises en œuvre :

- Des observations utilisateurs d'équipages de pilotes en contexte opérationnel, sur simulateur et lors d'un vol commercial (2.2.1).
- Une analyse expert de l'existant et des contraintes techniques (2.2.2).
- Une approche théorique basée sur les connaissances issues de deux domaines : la psychologie de la perception visuelle (2.2.3) et la typographie (2.2.4).

Cette phase d'analyse du besoin et de l'existant nous a permis de proposer des critères d'utilisabilité et des recommandations au design qui ont été fournis en entrée de la phase de conception, et utilisés pour les évaluations expérimentales et la validation opérationnelle des fontes.

2.2.1. Analyse des besoins et de l'existant technique

Nous restituons ici une partie synthétique des résultats de cette phase d'analyse qui a donné lieu à plusieurs livrables industriels.

2.2.1.1. *Analyse de l'activité et des besoins*

2.2.1.1.1. Cockpit : activités multiples et interfaces complexes

Sur les vols commerciaux, l'équipage des pilotes assure cinq activités principales : le pilotage de l'avion (manuellement ou en mode pilote automatique), la navigation (gestion et suivi du plan de vol), la supervision des systèmes et paramètres avions, la communication avec les contrôleurs aériens ou les services supports au sol (ex. maintenance) et enfin la gestion de la mission (gestion du vol commercial, supervision des personnels navigants commerciaux et gestion des passagers). Pour mener ces activités, les pilotes interagissent avec des interfaces spécialisées affichées sur les différents écrans du cockpit.

La complexité croissante des systèmes avions a conduit à une approche intégrative du cockpit avec une agrégation des systèmes CDS (Cockpit Display System) et des systèmes d'information (Onboard Information System) et de maintenance (Onboard Maintenance System). Le programme A380 a introduit le nouveau concept de «Interactive Cockpit», caractérisée par une continuité de l'interaction entre écrans (espace d'affichage continu et curseur partagé), et une architecture graphique de l'interface de type pseudo-WIMP, avec des fenêtres statiques non superposables, des widgets (bouton, menu, onglets, pages...) et des curseurs (un par pilote) pilotés par boules roulantes. Il en résulte une augmentation significative des fonctions et pages accessibles aux pilotes ainsi que des données affichables. Ces nouvelles visualisations, plus complexes, peuvent être cause de nouveaux risques pour l'utilisabilité du système.

2.2.1.1.2. Observation de l'activité des équipages commerciaux

Parallèlement à l'étude technique de l'existant réalisé hors contexte d'usage à partir de documents et copies d'écran, nous avons observé l'activité et l'utilisation en contexte métier des affichages textuels. Nous avons réalisé trois observations d'équipages professionnels en situation opérationnelle de pilo-

tage sur appareils AIRBUS. Deux séances d'observation ont été organisées par Airbus sur simulateurs avions A320 (cf. Figure 20) et A350, une troisième observation a été menée en conditions réelles de vol et dans le cockpit, lors d'une liaison commerciale Paris-Toulouse.



Figure 20 : Affichage cockpit lors d'une séance d'observation d'un équipage sur simulateur A320

Les séances sur simulateur se sont déroulées en 3 phases. Une première phase s'est appuyée sur la réalisation d'un court vol simulé et nous a permis d'observer l'activité des pilotes dans un cadre « nominal » et sans pression temporelle particulière. Une deuxième séance de simulation, intégrant des conditions de vol dégradées, soumettait l'équipage à une forte charge cognitive et imposait aux pilotes des actions plus rapides, et nous a permis d'observer les parcours visuels et la brièveté des temps de fixation en situation « critique ». Enfin, la session se terminait par une interview de l'équipage hors activité, pendant laquelle nous avons demandé aux pilotes de faire appel à leur expérience globale de pilotage des systèmes Airbus, pour préciser leurs utilisations des affichages textuels, les difficultés rencontrées et donner leurs appréciations sur la police CDS et sa mise en œuvre dans les interfaces.

Pendant la simulation, nous avons centré les observations sur l'activité des pilotes liée à l'usage des informations textuelles affichées sur les écrans du cockpit. Nous avons demandé aux pilotes de formuler à voix haute leurs activités de prises d'informations visuelles, si les contraintes de la tâche ou l'exécution des procédures le permettaient, pendant les différentes phases du vol. Ces verbalisations étaient spontanées, simultanées ou consécutives à la tâche, ou provoquées par nos questions ou relances. Les questions portaient sur des demandes de précision ou de généralisation de leurs expériences professionnelles concernant la perception visuelle des affichages textuels, mais aussi à nos interrogations sur l'activité ou sur notre propre perception des affichages rendus par les dispositifs. Nous les avons ensuite, hors simulation, interviewés sur leurs besoins de lecture et de structurations des informations, ainsi que sur l'utilisabilité, les qualités, les défauts des IHM et de la fonte existante. Enfin, nous leur avons demandé de restituer leurs expériences de difficultés, problèmes ou incidents de perception visuelle de ces informations lors de missions sur avions AIRBUS.

2.2.1.1.3. Un contexte d'usage et des besoins très spécifiques

Les observations des pilotes en activité dans le cockpit ont montré qu'à la fois le contexte d'usage, mais aussi que les données affichées elles-mêmes

présentaient des caractéristiques singulières, entraînant ainsi des besoins très spécifiques. L'activité des pilotes en mode « nominale » est complexe et requiert pour certaines phases du vol (par exemple les phases de décollage et d'atterrissage) un nombre conséquent d'opérations et d'interactions avec de multiples interfaces (affichages et interacteurs physiques) et une importante coordination entre les deux pilotes. La pression temporelle est forte et les sauts oculaires nombreux et rapides (corrélations d'informations issues de différents systèmes et affichages). Ces actions complexes sont réalisées par les opérateurs dans le cadre de procédures fortement contraintes, nécessitant une coopération entre pilotes (ex. collationnement), un haut niveau de formation et un entraînement continu (performance).

Nous avons pu observer les pilotes dans des contextes d'usage dégradés, par exemple en choisissant des séquences d'incidents de vol sur le simulateur. Les observations et les retours des pilotes ont exposé une augmentation des difficultés de lecture notamment sur la lisibilité des caractères eux-mêmes. Lors de ces phases critiques, la pression temporelle est encore plus importante. Nous avons pu ainsi observer des temps de fixations oculaires très brefs (en deçà du seuil de lecture) pour vérifier par exemple la différence de pression des moteurs. Les pilotes nous expliquant qu'ils cherchaient juste une confirmation visuelle d'un niveau approximatif d'équilibre et que la perception de la forme globale des valeurs (par exemple le nombre de digits ou le premier chiffre) leur suffisait pour vérifier ce fait.

Nous listons ci-après une synthèse des besoins spécifiques les plus importants.

2.2.1.1.4. Identification des besoins pour le design typographique

[N1] Conditions lumineuses extrêmes ou dégradées :

Même en situation « nominale » les pilotes passent incessamment d'un écran à l'autre afin de recueillir et compiler des informations. Pour le PF (Pilot Flying), la transition visuelle entre l'intérieur de l'avion et les écrans du cockpit et l'extérieur (ciel devant l'avion) impose des contraintes très fortes de basculement de contexte (focalisation, luminosité). Ces constantes adaptations de luminosité et de focus génèrent inconforts visuels et fatigue. Les allers et retours visuels sont plus rapides par mauvais temps. Les situations de plus grande fatigue ou le port de lunettes sont des facteurs aggravants de cette gêne visuelle aux variations de luminosité.

Plus spécifiquement, des situations particulières existent d'éclairement violent des écrans du cockpit par un fort ensoleillement venu de l'arrière de l'appareil et traversant les hublots latéraux du cockpit. Les informations textuelles doivent donc rester lisibles dans ces contextes lumineux dégradés.

[N2] Angles de vision :

L'affichage multi-écrans des interfaces du cockpit implique que les pilotes doivent pouvoir lire les informations textuelles malgré des fortes variations d'angles et de distances de lecture (cf. 2.2.4.1). Le rendu de ces informations doit donc être visuellement robuste aux déformations (ex. préservation des formes et de l'espacement).

[N3] Pression temporelle :

La durée des fixations visuelles, qui requièrent plus de temps pour des affichages d'informations plus denses et plus complexes [Bellenkes 1997], peut

néanmoins se trouver réduite (trop brève ?) en contexte de forte charge mentale [Wickens 1999]. Ce risque de forte limitation potentielle du processus de lecture en contexte dégradé doit être pris en compte, notamment par des évaluations expérimentales prenant en compte ces contextes (temps de lecture, charge cognitive).

[N4] Des données textuelles très spécifiques :

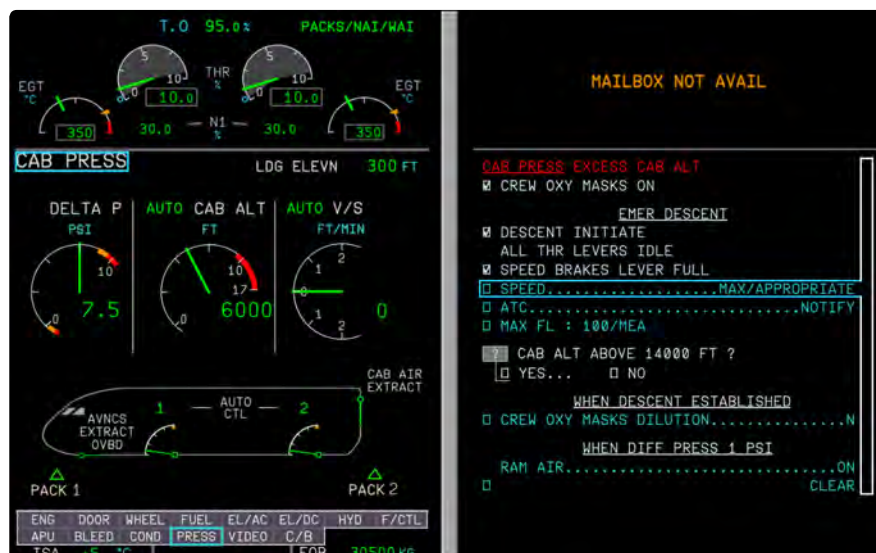


Figure 21 : Informations textuelles sur les écrans ECAM/SD

Les textes affichés sur les interfaces du cockpit sont très spécifiques (voir Figure 21). Ces données textuelles sont principalement des informations symboliques et non verbales : valeurs numériques, symboles d'unités (ex. « KT ») et mots symboliques courts - abréviations de modes (ex. « LOC »), identifiants aéronautiques (ex. « SOKMU ») ou systèmes (ex. « APU »). Ce sont aussi des groupes nominaux de quelques mots abrégés, des textes de labels ou des phrases courtes écrites de façon abrégée comme les lignes de menu (ex. « FROM P.POS DIR TO* »), ou les lignes de procédures (ex. « DR L/G GRVITY EXTN: MAX SPEED 220 KT »).

Certaines informations textuelles mélangent caractères alphabétiques et chiffres, comme les identifiants ATC des avions ou même des valeurs de champs (ex. « (120/10)HD9 »). Contrairement à la lecture de textes continus, où l'absence visuelle de caractères au sein des mots n'empêche pas la lecture (le cerveau complétant aisément le texte manquant), la lecture des informations textuelles du cockpit nécessite une identification visuelle absolue de chacun des caractères.

[N5] Lisibilité des textes et hiérarchie de lecture :

La densité du texte sur les affichages du cockpit est parfois assez importante. Le ratio largeur sur hauteur W/H des caractères est selon la résolution d'affichage d'environ 6,5/10 et l'interlettrage est faible (environ 2 pixels pour 17 pixels de hauteur capitale). Le dessin du caractère lui-même a des défauts qui tendent à provoquer une confusion entre certaines lettres. Des problèmes importants ont été trouvés concernant l'espacement visuel, la forme de la lettre ou le contraste. Enfin, les polices utilisées entre les différents écrans sont parfois hétérogènes. La proximité ou la superposition des éléments graphiques (surli-gnage, encadrement, informations météorologiques, cartes) peuvent interférer de façon significative avec la lisibilité des textes.

De plus, le texte affiché n'est hiérarchisé sur les écrans CDS que par la taille de fonte utilisée ou par l'emploi de la couleur. La présence de décorations graphiques trop proches des textes, comme les filets génère un *bruit visuel* et une gêne à la bonne perception des caractères. Une utilisation de variation de fontes, variante de graisse (ex. gras ou *Bold*) ou d'aplomb (ex. italique) permettrait une meilleure différenciation visuelle.

2.2.1.2. Analyse technique de l'existant

L'analyse technique de l'existant a débuté par une analyse préalable des différentes interfaces du cockpit réalisée sur document (spécifications, rapports, copies d'écran). Elle s'est ensuite centrée sur l'étude des moyens techniques et typographiques et les contextes techniques de mise en œuvre, de l'affichage numérique des informations textuelles sur les écrans des avions actuels. L'analyse a porté sur les systèmes et dispositifs du cockpit : CDS, OIS, OMS, et cabine : FAP, des interfaces des avions AIRBUS de dernières générations (A380/A350).

Nous ne reporterons ici que quelques éléments de cette étude : une présentation des différentes interfaces en caractérisant leur type et leur usage de l'information textuelle, ainsi que deux aspects typographiques plus particulièrement significatifs pour illustrer notre problématique.

2.2.1.2.1. Interfaces du cockpit et types de représentation

La conception des interfaces du cockpit est fondée sur trois modèles de représentation et de composition des écrans que nous désignerons ci-après comme « instrumentale », « schématique » et « formulaire ».

■ Représentation de type instrumentale

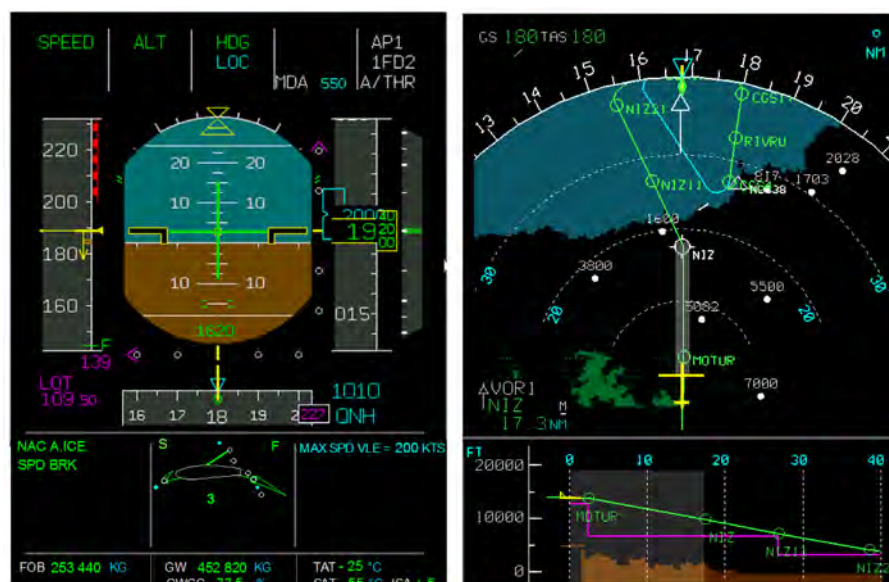


Figure 22 : Les écrans EFIS du cockpit intègrent (à gauche) le Primary Flight Display (PFD), et (à droite) le Navigation Display (ND).

La Figure 22 présente les deux écrans EFIS (*Electronic flight Instrument System*) du cockpit qui associe l'écran dédié au pilotage « PFD » (*Primary Flight Display*) et l'écran dédié à la Navigation « ND » (*Navigation Display*). Les

interfaces graphiques de ces systèmes sont basées sur une représentation de type « instrumentale » : l'affichage des textes et la composition graphique des écrans imitent ceux des instruments mécaniques remplacés dans le glass cockpit⁵.

Les informations textuelles sont essentiellement des valeurs numériques, des symboles d'unités et des mots symboliques courts : abréviations d'état de vol, identifiants aéronautiques ou systèmes. Cet affichage est fortement dynamique : défilement des valeurs de niveau ou de vitesse sur le PFD par exemple, et utilise des transformations géométriques de translation, rotation (horizon, conservateur de cap) sur PFD et ND, en fonction de l'évolution des paramètres de vol, de zoom et de changement de repère sur le Navigation Display (modes). Le texte affiché peut être orienté et venir se superposer à des tracés impliquant un contexte bruité des caractères. Des arrière-plans (fonds de carte ou surfaces colorées) associés aux couleurs d'état de l'information modifient la valeur de contraste fond/détail des textes affichés. Ces caractéristiques augmentent l'exigence de discrimination des caractères.

■ Représentation de type schématique

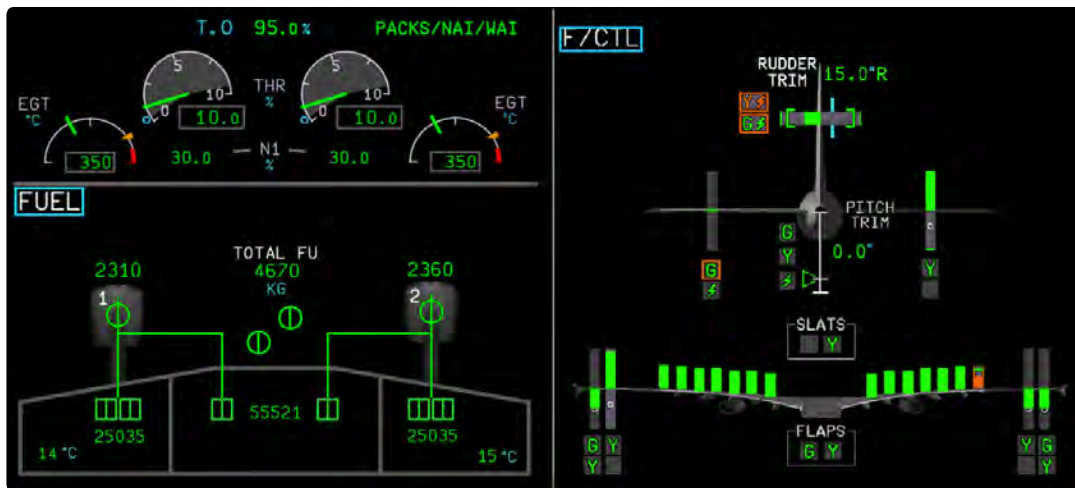


Figure 23 : Représentations schématiques des systèmes avion de l'interface SD

Les écrans ECAM (*Electronic Centralized Aircraft Monitoring*) « EWD » (*Engine and Warning Display*) et « SD » (*System Display*), de gestion du système, utilisent des représentations de type « schématique » (Figure 23). Les textes sont essentiellement des valeurs numériques, des symboles iconiques, le nom des systèmes ou des abréviations d'état. La composition des pages est spécifique à chaque fonction. Les textes et graphiques sont souvent organisés de manière « écologique » pour respecter la configuration avion (moteur, réservoirs, fuselage, etc.) mais aussi une symbolique naturelle, par exemple la fermeture d'un circuit (perpendiculaire au circuit) ou l'écoulement gravitationnel (par exemple l'écoulement du fuel). La position des textes sur la page est statique. Quatre tailles de fonte sont mises en œuvre, les informations sont hiérarchisées par la taille utilisée. La couleur des textes et des graphiques présente l'état des composants (ex. vert = OK).

⁵ Le concept de glass cockpit désigne un cockpit basé sur des affichages-écran des interfaces systèmes (aujourd'hui principalement LCD), qui ont remplacé les instruments afficheurs et jauges mécaniques.

avec les fontes actuelles (CDS). La distance visuelle de l'opérateur est calculée pour le centre des écrans à partir des distances des points A1 à A20 (figure 1). La hauteur du texte est calculée pour un pitch cible de l'écran de 0.204mm. L'angle de vision (vertical) est calculé pour chacune des tailles de fonte CDS, sur chaque écran, selon la formule standard : $\tan\theta = s/d$ où θ est l'angle de vision en degré, s la hauteur du caractère en mm, et d la distance visuelle de l'opérateur à l'écran (voir Figure 26), ou plus simplement : soit la hauteur comporter jusqu'à 4 ou 5 mots (souvent abrégés). Deux tailles de fontes sont utilisées pour afficher la plupart des informations. Les données composent visuellement des blocs de caractères (souvent 2 à 5 caractères), assez largement espacés, mais fortement alignés : horizontalement en lignes ou en label multimots et verticalement en listes de valeurs ou d'équipements.



Figure 24 : Exemples d'écrans du FMS

2.2.1.2.2. Architecture des plans d'affichage du cockpit

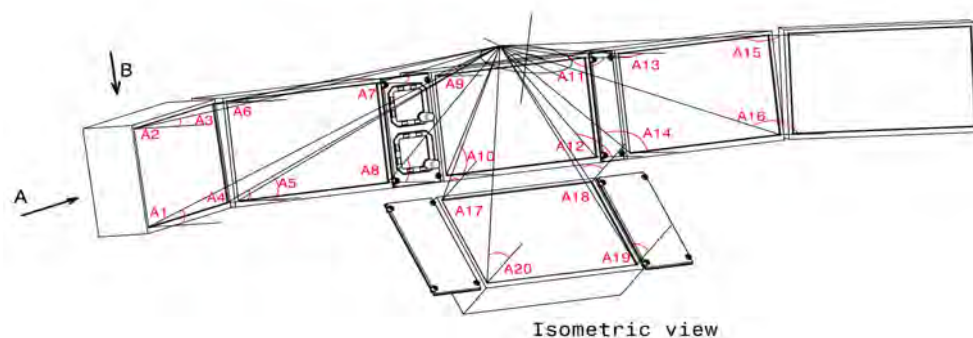


Figure 25 : Architecture des plans d'affichage dans le cockpit A350

La Figure 25 présente la disposition des écrans du cockpit de l'A350, système de référence pour notre étude. Le document de spécification technique décrit l'ensemble des distances (et angles) entre la position référentielle de l'œil du pilote et la géométrie des surfaces d'affichage. Il nous permet d'évaluer les angles de vision pour chaque pilote du texte affiché sur ces différents écrans avec les fontes actuelles (CDS). La distance visuelle de l'opérateur est cal-

culée pour le centre des écrans à partir des distances des points A1 à A20 (figure 25). La hauteur du texte est calculée pour un pitch cible de l'écran de 0.204 mm. L'angle de vision (vertical) est calculé pour chacune des tailles de fonte CDS, sur chaque écran, selon la formule standard : $\text{Tan}\theta = s/d$ où θ est l'angle de vision en degré, s la hauteur du caractère en mm, et d la distance visuelle de l'opérateur à l'écran (voir Figure 26), ou plus simplement : soit la hauteur de rendu de l'objet visuel (en cm) $\times 57.3$ / distance (cm) $\times 60$ (conversion en minutes).

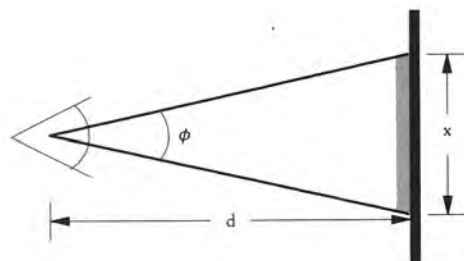


Figure 26 : Angle de vision, distances, et fréquences spatiales. $x = 2d(\tan\theta/2)$.
Si $\theta = 1/60^\circ$ et $d = 12$ inches, alors $x = .0035$ «, ou 286 cycles/inch

Les résultats principaux sont présentés par le tableau 1 :

Tableau 1 : Calcul des angles visuels verticaux pour les 4 fontes CDS

	fonte T1	fonte T2	fonte T3	fonte T4
Hauteur en pixels du caractère intégrant une épaisseur de tracé (graisse) de 3 pixels	18	21	23	28
Hauteur réelle en mm d'affichage du caractère pour un écran avec pitch de 0.204	3.67	4.28	4.69	5.71
Angle visuel en minute d'arc sur écran 1 (A1-A4) : distance œil opérateur/centre écran = 799.6 mm	15.79	18.42	20.17	24.56
Angle visuel en minute d'arc sur écran 2 (A5-A8) : distance œil opérateur /centre écran = 843.55 mm	14.97	17.46	19.12	23.28
Angle visuel en minute d'arc sur écran 3 (A9-A12) : distance œil opérateur /centre écran = 1002.9 mm	12.59	14.69	16.08	19.58
Angle visuel en minute d'arc sur écran 4 (A17-A20) : distance œil opérateur /centre écran = 1013.25 mm	12.46	14.54	15.92	19.38

Dans le tableau 1, les angles de vision présentés sont calculés pour les quatre écrans principaux utilisés par chacun des deux pilotes (ici côté gauche). L'écran 1 correspond à l'écran OIS (Onboard Information System) regroupant l'ensemble des documentations ; l'écran 2 aux écrans EFIS : PFD (Primary Flight Display) et ND (Navigation Display) de pilotage et navigation ; l'écran 3 et 4 aux écrans partagés entre pilotes ECAM (Electronic Centralized Aircraft Monitor) et MFD (Multi Function Display) de gestion avion et mission.

La partie 2 de la norme européenne « EN 894-2 » [AFNOR 1997] concerne les « dispositifs de signalisation ». Dans sa section 4.2.1 « symboles utilisés pour les dispositifs de signalisation » elle préconise un angle de vision compris entre 18 et 22 minutes, un angle compris entre 15 et 18 minutes pouvant être acceptable. Des études plus spécifiques, notamment de la FAA présentent des recommandations assez similaires. Les angles de vision calculés (tableau 1) pour les 5 positions d'écrans présentent des mesures limites ou légèrement en deçà de la norme basse AFNOR (minimum 15 minutes) pour la fonte T1

sur l'ensemble des écrans et pour la fonte T2 sur 2 d'entre eux. Il faut noter que les pilotes sont sélectionnés, entre autres, pour leurs performances perceptuelles, et que leur acuité visuelle est vérifiée régulièrement. D'autre part le choix des tailles de fonte est défini en fonction de l'importance des données affichées et validé au travers de processus opérationnels exigeants.

Par rapport à notre problématique, la conception de typographies favorisant la discrimination visuelle implique d'instrumenter des ruptures ou des différences visuelles (discontinuités) entre dessins des lettres. Cette discrimination est plus difficile à garantir dans le cadre des typographies numériques et notamment pour l'affichage de texte à basse résolution avec des technologies d'écran comme le LCD favorisant l'*aliasing*. Franck Jalleau, créateur typographe de l'Imprimerie Nationale, a notamment créé les caractères des passeports et cartes d'identité français. Ces caractères de basse résolution (grille de 5×3 pixels) sont aux limites de capacité pour la représentation des lettres. Par exemple, la lettre « E » capitale qui présente 3 traverses horizontales superposées nécessite au minimum 5 pixels de hauteur ($3 + 2$ intervalles) pour permettre de percevoir les 3 lignes superposées. Notre expérience du développement de fontes pour une activité critique comme l'ATC montre que le design de caractères favorisant la discrimination nécessite au minimum une grille de 10×8 pixels, voire 12×10 pixels pour permettre d'exprimer graphiquement des différences visuelles significatives entre glyphes pour un jeu de symboles limité (≈ 100 caractères). Cette grille de 12×10 pixels permettant d'implémenter un niveau de contraste suffisant de la lettre (variation d'épaisseur du tracé). Les techniques d'antialiasing actuelles comme ClearType, une technique de rendu sous-pixel mise au point par Microsoft, permettent de mieux restituer visuellement la différenciation des formes.

Le pouvoir de résolution de l'œil étant d'environ une minute d'arc (60 secondes d'arc, $0,017^\circ$), la taille de rendu correspondra à une hauteur capitale minimale de 10 à 12 pixels dépendant du *pitch* de l'écran (ou de la distance qui sépare deux pixels) et de la distance à l'écran, avec un angle de vision correspondant par exemple à 16 à 20 minutes d'arc pour les écrans radar ATC actuels [Vinot 2007].

2.2.1.2.3. Fontes CDS : gabarit, forme des lettres et discrimination visuelle



Figure 27 : Les symboles de la police CDS

L'affichage des informations textuelles sur les écrans des systèmes composant le cockpit est basé sur la mise en œuvre d'une police CDS (voir Figure 27). Le rendu visuel de cette police « filaire » s'apparente à celle des polices de type

dessin technique utilisées avec les logiciels de CAO (fontes "SHX" AutoCAD). Le dessin de chaque caractère est spécifié géométriquement par un ensemble de segments de ligne et d'arcs de conique, définissant un « squelette » du tracé de contour du symbole. La police CDS intègre un jeu de 74 caractères : lettres capitales latines, chiffres, ponctuation, ainsi qu'un ensemble de symboles. La police est à espacement non proportionnel (*monospace*), tous les caractères sont conçus pour s'inscrire dans une même boîte englobante (bounding-box) comprenant la lettre et l'espacement avec le caractère suivant. La Figure 28 illustre la forme très particulière des extrémités des primitives « obliques » (ou « branches ») des lettres. Pour augmenter l'angle interne de ces obliques en respectant la largeur du caractère, les branches se terminent par une cassure visuelle verticale, ou proche de la verticale pour le « A ». Ce dessin contraire à l'écriture et à la forme « théorique » du caractère augmente l'effet « rectangulaire » de la police CDS et diminue le contraste de forme et la lisibilité de la lettre.

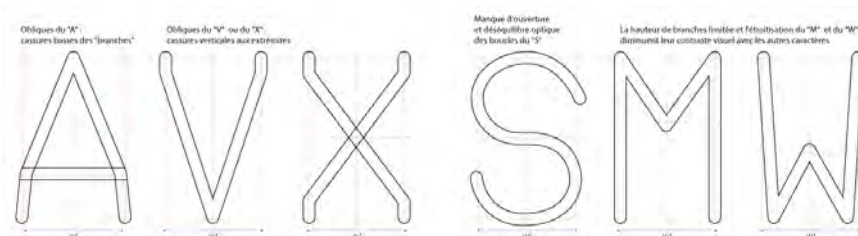


Figure 28 : 6 exemples du dessin (filaire) des lettres de la police CDS et de l'impact visuel des choix géométriques (coniques, gabarit, espacement monospace...)

La mise en œuvre de la police CDS sur les IHM du cockpit définit 4 tailles d'affichage correspondant à 4 fontes T1, T2, T3, T4 (Figure 29), d'une hauteur d'affichage prévue de 3.125 à 5mm. Les fontes sont constituées de caractères bitmap de rendu, générés par programme logiciel à partir des définitions vectorielles pour chacune de ces tailles. Les tracés sont rastérisés en tenant compte de la résolution d'affichage cible, avec une épaisseur de tracé (*stroke*) constante (3 pixels), et antialiasés.



Figure 29 : Rendu du caractère « A » dans les 4 tailles de fonte avec une épaisseur de tracé constante (à gauche), espacements visuels hétérogènes entre différents caractères affichés par une fonte CDS (à droite).

Ces propriétés de construction des lettres, restriction des formes à segments de droite et coniques, largeur visuelle identique des caractères et épaisseur constante, même entre caractères de taille différente, produisent une forte égalité visuelle des symboles (voir Figure 27), mais aussi une forte hétérogénéité visuelle des espaces entre lettres (Figure 29 à droite).

Ces caractéristiques de dessin des formes ne sont pas favorables à la discrimination et à l'identification visuelle des caractères, notamment pour une lecture efficace en contexte dégradé (par exemple pour un contexte lumineux défavorable diminuant le contraste d'affichage). De plus, le besoin N4 (voir 2.2.1.4), issu de l'analyse de l'activité, soulignait la spécificité non verbale des informations textuelles, qui rendait difficile une reconstitution des caractères à l'aide du seul contexte. Ces constats et le cadre critique d'usage impliquent

l'exigence d'une conception typographique garantissant une forte discrimination visuelle entre signes typographiques pour permettre une identification « absolue » de chacun des caractères. Cette exigence impose la mise en œuvre d'un principe de discontinuité dans le dessin des caractères pour créer des ruptures visuelles suffisantes entre lettres.

À l'inverse, le gabarit géométrique de construction des lettres et le choix d'un espacement monospace ont de forts impacts sur la continuité visuelle du texte et la lecture. Le respect du gabarit, l'utilisation des seules courbes coniques et le tracé d'épaisseur constante engendrent des effets optiques d'inégalité de hauteur par exemple entre caractères : le « A » paraîtra plus petit que le « E » par exemple. La création typographique tient compte des effets d'illusions optiques pour introduire des corrections dans les alignements et le dessin des lettres. D'autre part, la largeur identique des caractères et des espacements, qui ne prend pas en compte le dessin particulier de la lettre, produit une forte hétérogénéité visuelle. La partie droite de la Figure 29 montre l'effet visuel de cet espacement régulier sur deux « mots » symboliques, « FLT » et « NBR ». Ce choix de design, apparemment régulier, provoque en fait une discontinuité non favorable pour la lecture.

2.2.2. États de l'art lisibilité

Deux états de l'art ont été réalisés pendant la phase initiale du projet, avec pour objectif de rassembler un ensemble d'apports théoriques concernant la problématique de la lisibilité de l'information textuelle affichée sur écran. Cette problématique a été explorée à partir de deux domaines scientifique et technique : la psychologie de la perception, avec plus précisément la problématique de la lecture de textes numériques, et la typographie, avec une étude centrée sur les principes et moyens de la lisibilité.

2.2.2.1. Traitement perceptif de l'information visuelle textuelle affichée sur écran

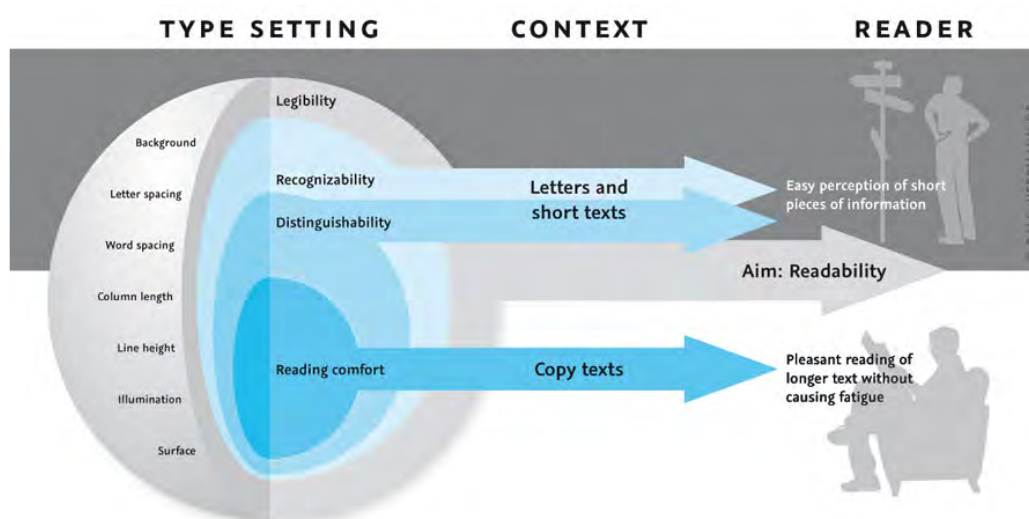


Figure 30 : Lecture d'un texte : contexte d'usage, niveaux de perception et impacts du rendu de texte sur la lisibilité

La performance et le confort de lecture sont fortement dépendants des lecteurs eux-mêmes (acuité ou déficience visuelle), de la nature de l'activité, mais aus-

si du contexte de lecture (lumière, distance, stress, périphérique d'affichage). À l'inverse, les propriétés visuelles des textes, dépendantes du choix et de la qualité des polices de caractères de rendu, ont un impact considérable sur cette performance et ce confort de lecture que définit la notion de lisibilité du texte (cf. Figure 30).

Pour tous ceux dont le travail implique la présentation de l'information textuelle, qu'elles soient imprimées sur papier ou affichée sur l'écran, il existe un grand corpus de connaissances et de règles ergonomiques destinées à faciliter la lisibilité du texte, allant du choix de la police (qui intègre toutes ses propriétés de forme et de composition), de sa taille, de la couleur et du contraste, jusqu'à l'espacement et la disposition du texte. Tout en tenant compte de cette *littérature*, le contexte opérationnel d'usage et les exigences très spécifiques du domaine d'application - systèmes critiques des cockpits aéronautiques et contraintes réglementaires de sécurité aérienne - nous ont conduits à revenir sur des aspects théoriques fondamentaux des mécanismes de la lecture et sur un ensemble de connaissances issues du domaine de la typographie. En effet, la pression temporelle et les sauts visuels incessants, les contextes d'éclairage extrêmes ou de fatigue (ex. vol de nuit), ou encore la nature très spécifique des données par exemple, contraignent fortement l'affichage et la lecture des éléments textuels. D'autre part, il existe une attente considérable de l'opérateur sur la nature et la localisation de l'information affichée. Ce contexte d'usage diffère ainsi profondément du cadre habituel de la lecture de documents textuels sur écran. L'ouverture de notre étude vers de nouvelles solutions imposait de confronter notre contexte spécifique de lecture, à la connaissance disponible sur les mécanismes de base de la lecture.

Nous n'avons retranscrit ici qu'une partie réduite de ce travail d'état de l'art sur le traitement perceptif de l'information visuelle, mené pendant la phase d'analyse initiale du projet. Nous choisissons de présenter quelques éléments qui répondent particulièrement aux aspects de continuité et de discontinuité et qui ont été utilisés pour le design graphique de la lisibilité.

2.2.2.1.1. Saccades et fixations oculaires

Pendant la lecture, les yeux parcourent le texte par petits mouvements rapides et précis. Quatre ou cinq fois par seconde, le regard s'arrête sur un mot (cf. Figure 31). Ces mouvements oculaires, une succession de saccades et de fixations, ont pour effet de projeter des groupes de lettres tour à tour sur la partie centrale de la rétine, la fovéa, dont la précision permet une bonne discrimination de la forme des lettres. Cette zone de grande acuité visuelle est extrêmement petite, 1 à 3 degrés d'angle visuel, et représente environ 4 ou 5 lettres (cf. Figure 32) dans des conditions habituelles de lecture.

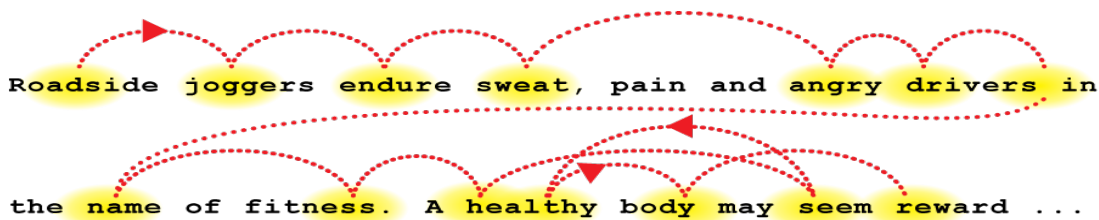


Figure 31 : Principe des mouvements oculaires pendant la lecture d'un texte

La longueur des saccades et la durée des fixations varient avec la difficulté du texte et l'expérience du lecteur. La longueur parcourue par une saccade,

autrement dit, le nombre de caractères « sautés » entre deux points de fixation est en moyenne de 7 à 8 caractères, et peut s'étendre de 1 et 24 caractères. Une saccade peut se faire en progressant dans le texte ou bien en revenant en arrière. Une régression dans le texte est plutôt déterminée par des fonctions cognitives supérieures, par exemple la vérification que le mot fixé est compatible avec l'interprétation faite de mots précédents. Entre deux saccades, le regard se fixe pendant 200 à 300 millisecondes (ms).

~~Among these articles of faith, legibility is perhaps the most common.~~

Figure 32 : Champ et empan visuels : la vision de la partie centrale, projetée sur la fovéa est précise (vision haute fréquence) et devient de plus en plus floue dans les parties périphériques du champ récepteur (vision basse fréquence)

La rétine n'est pas homogène, ce qui conduit à des différences considérables dans la capacité de perception des parties centrales par rapport à la partie périphérique du champ récepteur. Nous ne percevons précisément que la petite partie du champ visuel qui est projetée sur la fovéa (cf. Figure 32). À partir de cette zone, le reste du champ visuel devient progressivement flou [Séré 2000] [Nazir 1992]. Il serait cependant faux de croire que c'est la taille des caractères qui détermine la facilité de lecture : les petits caractères seraient plus difficiles à lire que les gros. En fait, plus les caractères sont gros et plus les lettres d'un mot s'écartent vers la périphérie de la rétine, devenant alors floues. Au contraire, des caractères plus petits permettent de percevoir nettement un plus grand nombre des lettres constituant le mot. Du coup, les deux facteurs — précision centrale, flou périphérique — se compensent presque exactement : du point de vue de la précision rétinienne un mot énorme et un mot minuscule sont équivalents, à condition bien sûr que la taille des caractères ne descende pas au-dessous de la limite de résolution de la fovéa.

De par cette organisation de l'œil, les capacités de perception ne dépendent que du nombre de lettres que contiennent les mots, et non pas de leur taille absolue. De fait, les saccades oculaires qui permettent la lecture sont approximativement constantes si on les mesure en nombre de lettres parcourues alors qu'elles varient grandement en taille en fonction de la police de caractères utilisée. Lorsqu'il prépare les saccades, le cerveau adapte la distance parcourue par l'œil à la taille des caractères, de façon à avancer d'environ 7 à 9 lettres à chaque saccade. Cette valeur correspond donc approximativement au nombre de lettres qui sont traitées au cours d'une fixation du regard. La prise d'information est extrêmement brève puisqu'un temps d'exposition de 50 ms suffit pour que la lecture progresse de façon normale.

2.2.2.1.2. Processus de lecture et identification des caractères

Les études scientifiques montrent que le cerveau traite 3 à 4 lettres à gauche du point de fixation et 7 à 8 à droite. Cette zone correspond à ce qu'on appelle l'empan de perception visuelle des lettres. Au-delà de cette zone, le cerveau n'est pratiquement plus sensible à l'identité des lettres, mais seulement à la présence des espaces qui délimitent les mots suivants, permettant ainsi de préparer la prochaine saccade afin que le regard «atterrisse» assez près du centre du prochain mot. Les petits mots grammaticaux comme les auxiliaires, les pronoms ou les articles sont parfois esquivés tandis que presque tous les autres mots essentiels au contenu de la phrase, tels que les noms, les verbes, les adjectifs ou les adverbes, doivent être fixés du regard. L'utilisation par

le cerveau, non seulement des lettres, mais également des espaces entre les mots doit nous rendre attentifs au rapport entre l'espace de la lettre et l'espace entre les lettres dans la création d'une fonte dont l'aspect principal doit être la lisibilité.

Basé sur le nombre de caractères, généralement de 7 à 9, le cerveau anticipe la quantité de mouvement des yeux nécessaire à la saccade à réaliser pour sauter visuellement par-dessus le bon nombre de caractères, quelle que soit leur taille. Le temps de traitement peut être extrêmement bref. Bien que la durée moyenne de fixation soit d'environ 200 ms, une durée d'affichage de l'ordre de 50 ms permet la lecture [McConkie 1975]. Alors que la fovéa identifie exactement les caractères, la vision périphérique utilise leur forme globale afin d'anticiper les mots encore à traiter [Nazir 1992]. Certains caractères sont plus faciles à discriminer pour la vision périphérique, par exemple, «i» et «p» ou «L» et «M». Des études ont proposé de grouper les lettres en fonction de leurs caractéristiques anatomiques (fût, jambages haut ou bas...) [Jacobs, 1989]. Lorsque les formes des caractères sont très proches (par exemple «a» et «e»), le cerveau utilise des régularités linguistiques ou le contexte sémantique pour aider à l'anticipation. En fait, Reicher [Reicher 1969] a montré un effet du contexte de mot pour l'identification du caractère montrant que les lettres incorporées dans les mots sont identifiées plus rapidement que lorsqu'elles sont présentées isolément. Des travaux plus récents de Pelli [Pelli 2003] nuancent cet effet en montrant qu'un mot n'est jamais détecté comme une seule entité, mais plus probablement comme un ensemble de formes simples associées à une lettre. Ces résultats soutiennent l'idée que la lecture implique la détection et la probabilité de lettres à plusieurs niveaux en même temps : au niveau des caractères, des graphèmes, des syllabes et des mots, chaque niveau offrant un contexte linguistique pour aider à la reconnaissance. Toutefois, l'effet de contexte du mot est d'une utilité limitée pour déchiffrer certaines données textuelles spécifiques du contexte aéronautique (cf. 2.2.1.4) où la lisibilité peut reposer essentiellement sur la discrimination entre caractères isolés pour lever l'ambiguïté au sein de non-mots.

2.2.2.1.3. Perception visuelle et fréquences spatiales

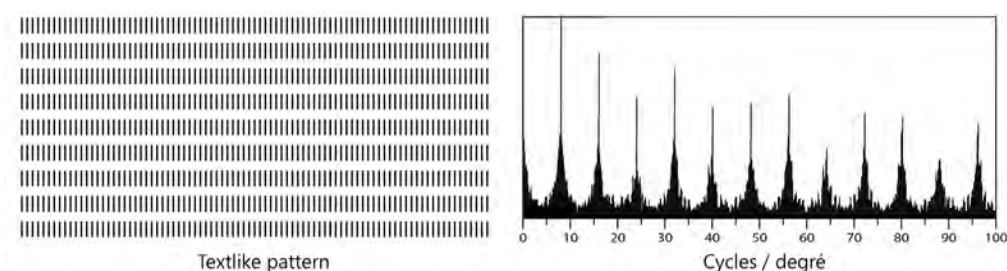


Figure 33 : Fréquences spatiales (à droite) d'un pattern de texte (à gauche)
[Rubinstein 1988]

La perception visuelle peut être décrite en termes de fréquences spatiales ou, en d'autres termes, comme un nombre de cycles par degré d'angle visuel. On peut très simplement visualiser cette notion comme celle d'une grille de très fines lignes verticales noires sur un fond clair : notre perception est optimale pour 8 lignes (ou cycles) par degré d'angle visuel (cf. Figure 33). Au-delà de 50-60 cycles par degré d'angle visuel, la plupart des gens perçoivent seulement un gris uniforme. Tout en étant une bonne approximation d'une situation standard, ces résultats ne sont pas absolus et dépendent du contraste d'affichage. Tout caractère (lettre ou symbole) d'une taille donnée à une distance

visuelle donnée peut être décrit en termes de fréquences spatiales : la forme globale sera perçue à partir des basses fréquences tandis que les détails fins seront accessibles à partir de fréquences plus élevées (cf. Figure 34).

Nous avons déjà indiqué que l'organisation spécifique de la rétine entraîne une diminution de la précision visuelle, de la fovéa vers la périphérie (cf. Figure 32). Une autre façon de décrire ce phénomène consiste à exprimer cette différence en termes de sensibilité différente aux fréquences spatiales : la fovéa est sensible aux hautes fréquences alors que la périphérie est sensible aux basses fréquences. La fréquence spatiale est donc une notion très utile pour décrire et comparer les formes des caractères [Rubinstein 1988]. Les composants de base (primitives) des formes des caractères sont constitués par des tracés verticaux, horizontaux ou obliques, des segments de droite ou des courbes. Dans une situation de lecture normale (confortable), les fréquences qui composent ces primitives du caractère sont faibles, généralement de 6 à 8 cycles par degré d'angle visual, tandis que les détails, tels que les empattements sont des composants à haute fréquence [Rubinstein 1988]. Plus récemment, Majaj [Majaj 2002] a proposé le concept de fréquence de tracé, et montré que la forme globale du caractère (faible fréquence de tracé) sera bien perçue par la partie périphérique de la rétine, mais les détails ne seront perçus que par la partie centrale de la rétine (*aka fovéa*).



Figure 34 : Image simulée de l'effet visuel des fréquences spatiales sur la lecture du mot « lost »

Ceci implique que pour aider la discrimination du caractère en vision périphérique, et donc faciliter l'anticipation visuelle du mot, le design typographique doit favoriser la lecture des composantes basse fréquence des caractères. Les affichages très lisibles permettent une bonne anticipation de la lecture et une baisse de la demande attentionnelle [Wickens 1999]. Quand les caractères projetés sur la partie périphérique de la rétine sont trop flous pour être lus, le cerveau utilise encore la perception pour détecter l'alternance entre espaces et caractères, ainsi que la longueur du mot. Afin d'améliorer encore la lisibilité, il convient de prêter une attention toute spéciale à la relation entre les espaces internes du caractère (appelés contreformes), et l'espacement entre les caractères et les mots.

2.2.2.2. *Principes et moyens typographiques de la lisibilité*

Le domaine de la typographie a produit un vaste corpus de connaissances, règles et techniques, mis en œuvre pour la création typographique et communément utilisé par les designers pour répondre aux besoins typographiques de l'IHM. Aujourd'hui, les technologies de gestion et de rendu du texte numérique sont très efficaces. La *typothèque* - bibliothèque de polices de caractères numériques - accessible est considérable. Elle est néanmoins principalement destinée à l'affichage de texte écrit en continu sous la forme de phrases.

La section 2.2.1.4 détaillait les besoins très spécifiques de l'affichage d'informations textuelles dans le cockpit dans un cadre d'usage critique (life-critical), avec notamment des exigences de sécurité opérationnelle, de performance et de robustesse en contexte dégradé. Pour répondre à ces besoins, nous avons dû revenir aux fondements de la typographie, du dessin de la lettre aux principes de l'harmonie typographique.

■ Définitions : police et fontes, signes, caractères et glyphes

Pour une définition des termes typographiques, se reporter au Glossaire typographique à la fin de mémoire.

Une *police de caractères* désigne en typographie un ensemble de fontes, ou famille, partageant un même style, par exemple ce texte est rendu avec une police *Century Schoolbook*. Une *fonte*⁶ numérique rassemble une collection de caractères typographiques, définis de façon vectorielle pour un ou plusieurs *invariants typographiques*⁷, par exemple *Century Schoolbook Italic*. Un caractère représente dans la fonte une variante d'un *signe* typographique, par exemple le caractère « A » correspondant à la LETTRE MAJUSCULE LATINE A (Unicode 0041). Un *glyphe* correspond à la trace « imprimée » sur un support ou, pour la typographie numérique, à la représentation graphique d'un signe typographique [Haralambous 2007].

Une étude préalable sur l'anatomie des caractères alphanumériques nous a permis d'identifier les éléments structurels des tracés et de lister les principales caractéristiques à préserver pour chaque glyphe. Ces éléments structurels caractérisant l'archétype de la lettre constituent à la fois les éléments de la discontinuité identifiant une combinaison unique de forme et des éléments réguliers de composition permettant de former la continuité visuelle des tracés (chaque fois que cette primitive est utilisée pour n'importe quel caractère, son apparence visuelle est homogène). Nous présenterons les résultats de cette étude ci-après.

2.2.2.2.1. Primitives typographiques : structurer la lisibilité de la lettre



Figure 35 : Principales primitives typographiques (à gauche),
nommage des différents composants de forme et de contreforme de la lettre (à droite).

La Figure 35 nomme les principaux composants anatomiques de la lettre. Cinq primitives majeures décrivent le dessin académique de la plupart des lettres latines : ce sont le *fût* ou la *hampe*, trait vertical du « I » par exemple,

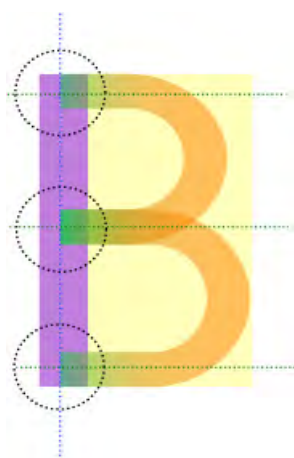
6 Le terme « fonte » vient du processus de fabrication des caractères typographiques par moulage à partir d'une matrice avec un alliage de plomb et d'antimoine fondus..

7 L'invariant typographique désigne une propriété qui s'applique à l'ensemble des caractères d'une fonte, ou du moins à une partie conséquente de ses caractères. Ces invariants peuvent être par exemple la graisse, l'aplomb, la chasse... cf. la section invariants ci-après

la *barre* ou *traverse*, trait horizontal comme la barre du « A » ou les trois traverses du « E », les *diagonales*, *obliques* ou *branches* du « A », « X », « K » ou « Z », les *panses*, *rondeurs* ou *bol* du « O » ou du « C », la *queue* du « Q » ou du « R ». A ces primitives s'ajoutent entre autres les *pointes*, les *contrepoinçons* ou les *boucles*, les *gouttes* ou les *empanchements* [Haralambous 2004]. La notion de contreformes (cf. Figure 35) est également très importante en typographie. Elle désigne la forme du vide ou *blanc* séparant les caractères ou au sein de ces caractères, par exemple le *contrepoinçon* ou la *boucle*.

Ce sont ces éléments visuels remarquables et leur composition unique pour chacune des lettres avec un respect de leur dessin qui doit permettre de garantir, en vision périphérique une bonne prévision, et une identification des caractères lors de la lecture du texte. L'art typographique consiste ainsi principalement à garantir l'expressivité (contraste et discontinuité) de ces primitives anatomiques tout en équilibrant (harmonie et continuité) le tracé des formes et contreformes ou *noir et blanc* du texte.

Une étude précédente (Blériot Fonts), que j'ai menée personnellement à destination des interfaces du contrôle aérien et de l'aéronautique (cockpit A380), a permis de caractériser la construction graphique des caractères alphanumériques sur la base de ces primitives, et de fournir des guidelines au design typographique. Nous en restituons ici deux extraits concernant les caractères « B » et « 8 », pour illustrer les problèmes potentiels de confusion visuelle entre caractères.

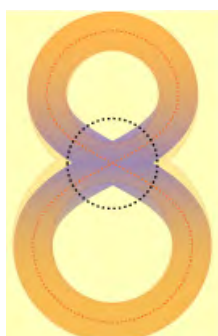


Construction :

Formée visuellement sur une composition rectangulaire, la lettre capitale B est structurée en 3 primitives : 1 fût vertical gauche et 2 panses, semi-circulaires, formées à gauche et horizontalement rattachées en haut, au milieu et au bas du fût.

Design :

La morphologie du B, bien qu'assez typée, peut entraîner dans certains contextes des confusions visuelles avec de nombreux autres caractères : le « 8 », le « 3 », le « R », le « S », le « 5 » voire le « E », ou plus particulièrement avec les paires « 13 », « l3 » ou « I3 ». Attention à bien marquer les 3 accroches « horizontales » au fût et à préserver l'équilibre optique du caractère en formant une panse supérieure plus « légère » (plus petite) que la panse inférieure.



Construction :

Formé visuellement sur une composition rectangulaire, le chiffre 8 est structuré en 2 primitives (qui peuvent être réalisées en un seul tracé gestuel) : 1 boucle formée en haut se prolongeant en « S » avec une boucle basse plus large se refermant en joignant la boucle haute. Le double croisement forme un « X » central. Une autre forme possible consiste à superposer les deux boucles circulaires.

Design :

La morphologie du 8, bien qu'assez typée, peut entraîner dans certains contextes des confusions visuelles avec de nombreux autres caractères : le « B », le « 3 », le « R », le « S », ou le « 5 ». Attention à bien marquer le croisement en « X » du raccordement central des 2 boucles et à préserver l'équilibre optique du caractère en formant une panse supérieure plus « légère » (plus petite) que la panse inférieure. Les 2 panses étant centrées horizontalement.

2.2.2.2. Régularités typographiques : garantir la continuité de lecture

La Figure 36 présente les principaux alignements du texte, utilisés comme un gabarit pour la création graphique des caractères, et spécifiés par un ensemble de métriques inclus dans le composant logiciel. Le corps, correspondant à la hauteur totale de la lettre, inclut l'espacement d'interlignage. Les caractères sont construits à partir de la ligne de pied sur laquelle viennent « s'appuyer » les caractères⁸. L'*ascent* correspond à la mesure partant de la ligne de base jusqu'au point le plus haut atteint par les glyphes, le *descent* la mesure de cette ligne au point le plus bas. Avec la ligne de pied, d'autres alignements visuels permettent d'harmoniser et de renforcer la continuité de lecture des caractères : l'alignement des capitales (hauteur capitale) et l'alignement haut des minuscules sans jambages, appelé hauteur d'x ou *x-height*. Des régularités implicites sont utilisées de façon plus spécifique comme les alignements de jambages des caractères minuscules. La hauteur des jambages supérieurs des minuscules peut dépasser la hauteur capitale.



Figure 36 : Structuration du texte, définition du corps et des alignements

Outre ces contraintes d'alignements, la régularité de dessin d'une typographie est fondée sur un principe de régularité visuelle des formes mais aussi des espaces, internes à la lettre (contreformes) ou entre les caractères, et basée sur une égalité perceptive de surface de ces espaces.

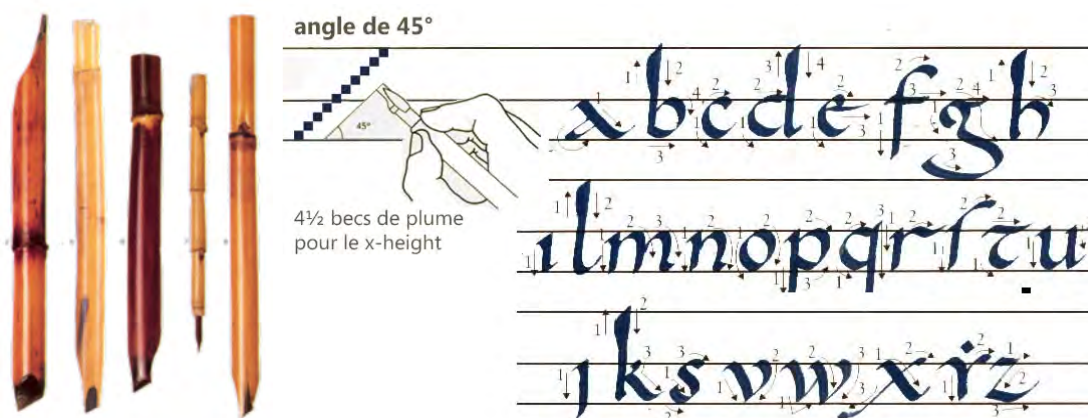


Figure 37 : Calames de roseaux taillés en biseau pour l'écriture manuscrite (à gauche), écriture Caroline tracée avec une plume biseautée et un angle régulier de 45° (à droite).

Enfin, le tracé lui-même est harmonisé par l'outil et les gestes de l'écriture calligraphique. Les formes typographiques des lettres, même pour les polices de caractères numériques, sont majoritairement issues de tracés cursifs, réalisés par exemple avec une plume typographique comme les calames (Figure 37 gauche) et surtout par une tenue de l'outil et un angle de tracé régulier. Ce tracé outillé forme une évolution continue de l'épaisseur du tracé en fonction de l'orientation du trait, régulière à l'ensemble des tracés. La Figure 37 à

8 L'alphabet latin est conçu pour « s'appuyer au sol », contrairement à d'autres alphabets, comme l'écriture hébraïque, qui « s'accroche au ciel » et dont les caractères sont tracés à partir du haut.

droite, présente l'écriture Caroline (XIII^e siècle) qui utilise un angle régulier de tracé à 45°. Cette typographie donnera naissance au XV^e siècle à la Caroline Humaniste, modèle des typographies *Humanes* et *Garaldes* et de très nombreuses fontes actuelles [Haralambous 2007].

2.2.2.2.3. Corrections optiques



Figure 38 : Le dessin des caractères intègre des corrections optiques.

Un bon dessin de lettre doit nécessairement intégrer une correction optique des formes. Par exemple, un carré et un cercle de même hauteur paraîtront visuellement différents de taille : le cercle semblera moins haut et moins large que le carré. La Figure 38 montre des corrections simples apportées au dessin des lettres : la *pointe* du « A » dépasse ainsi la ligne des capitales et la courbe du « C » dépasse en haut et en bas les alignements. De même que visuellement une distance en hauteur nous paraît plus importante que cette distance à l'horizontale, l'épaisseur d'une ligne horizontale paraîtra plus forte que la même épaisseur portée par une ligne verticale, les caractères dessinés manuellement intégreront ces subtilités augmentant encore la perception de continuité visuelle des formes et des lettres. Les courbes du contour sont ainsi géométriquement irrégulières (i.e. coniques), mais visuellement régulières.

Un autre effet important vient de l'effet de « pesanteur » appliqué aux formes matérialisées des caractères. Les règles d'harmonie en art et pour la typographie définissent une nécessité de stabilité graphique. Ainsi les caractères « B » ou « E » montrés par la figure 4 intègrent cette nécessité en réduisant visuellement la boucle supérieure du « B » ou en raccourcissant légèrement les traverses supérieures du « E » pour construire des lettres qui « *tiennent debout* » en respectant les lois de la gravité de Newton. Le raccourcissement supérieur de la traverse centrale du « E » répond à un problème d'alignement visuel.

2.2.2.2.4. Invariants typographiques : ajuster les propriétés graphiques

Les caractères typographiques peuvent être classés par formes typographiques : romain, italique, capitale, minuscule... ce sont les invariants typographiques. Pour la typographie numérique, ces invariants correspondent à des propriétés graphiques statiques, définies lors de la création des fontes comme l'*empattement*, l'*aplomb*, la *graisse* ou la *chasse*. La mise en œuvre numérique de ces propriétés nécessite la génération d'un fichier de fonte spécialisée, par exemple « Frutiger Bold Condensed ». À ces propriétés statiques des typographies numériques, s'ajoutent une propriété dynamique, le *corps*, dont la définition géométrique (vectorielle) du caractère sera rendue (rastérisée) à la taille demandée pour l'affichage, et une propriété de catégorisation : la *casse*, qui définit des types de caractères, capitale, minuscule et petite capitale. Certains logiciels graphiques spécialisés permettront de modifier ces propriétés protégées de la typographie comme l'approche (espacement) entre deux caractères.

La Figure 39 présente une formalisation réalisée par Frutiger pour la fonte Univers, des variantes de fontes, basée sur les invariants typographiques. L'image à droite montre une matrice de croisement des propriétés en x de *chasse* (*compressed, condensed, normal, extended*) et d'*aplomb* (*romain et italique*) et en y de la *graisse* (*ultra light, thin, light, regular, medium, bold, heavy, black, extra black*). La *graisse* est l'invariant typographique qui caractérise l'épaisseur ou la « force » de tracé d'un caractère, sa « *noirceur* ». Les variations de *graisse* sont visuellement très efficaces pour structurer les saillances de l'information textuelle. Pour les fontes numériques la rastérisation en pixels de ces variantes de *graisse* entraîne une « portance » différente de la couleur par le texte du fait de la surface et de l'arrangement des pixels réellement mis en œuvre, comme démontré par les résultats de l'expérimentation Kabuki [Tabart 2007]. La *chasse* caractérise la largeur visuelle du caractère par rapport à sa hauteur et permet de régler la densité d'affichage du texte : les fontes ODS sont ainsi légèrement étroitisées. L'*empattement* ou *sérif* est l'invariant typographique qui caractérise la présence ou l'absence de petites extensions qui forment la terminaison du tracé des caractères dans certaines polices. L'*espacement* correspond au mode de composition des caractères : *monospace* indiquant une emprise identique de chaque lettre (comme inscrite dans des cellules) ; *proportionnel* une largeur variable adaptée au dessin du caractère.



Figure 39 : Variations typographiques de la police Univers, créée par Frutiger, montrant l'usage des invariants typographiques (à gauche). tableau matriciel des variations de *chasse* en x et de *graisse* en y de la forme du « u » (à droite).

Ces invariants sont autant de propriétés graphiques des fontes sur lesquelles nous avons pu agir pour concevoir les polices de caractères aéronautiques, et comparer l'impact sur la lisibilité par la conduite de processus expérimentaux. Nous ne présentons ici quelques-unes de ces propriétés.

2.2.2.2.5. Lisibilité des typographies numériques

Les problèmes de lisibilité du texte dépendent fortement du contexte de lecture, très important dans le cadre de cette étude, et des contraintes imposées par le support et la technologie de production et d'affichage. Les formes typographiques classiques ont tenu compte de ces contraintes pour, inclure des techniques comme les *pièges à encre*⁹, visant à renforcer la lisibilité dans des conditions d'impression difficiles.

De nombreux travaux typographiques ont été réalisés pour permettre d'améliorer la lisibilité des textes, notamment pour adapter les polices de caractères

9 Creux de forme intentionnellement réalisés dans la gravure du caractère en plomb pour éviter aux lettres de se boucher lors de l'impression, notamment lorsqu'une fonte doit être imprimée en petites tailles sur des supports de médiocre qualité.

numériques et les techniques de rendu à l’affichage sur écran et améliorer dans ce contexte leur lisibilité, même pour des affichages à faibles résolutions. Nous n’en citerons ici que quelques-uns.

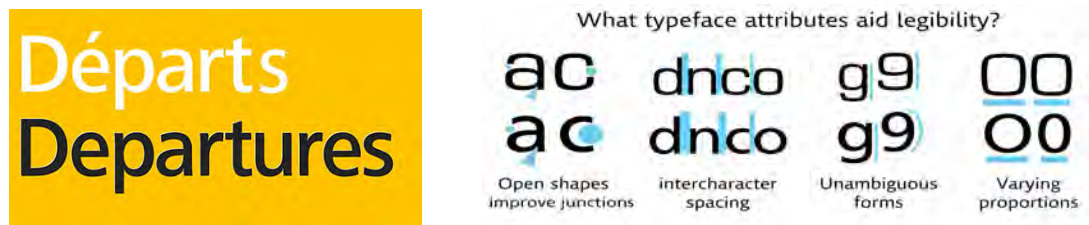


Figure 40 : Roissy, une typographie pour la signalétique de l’aéroport CDG (à gauche), éléments de design favorisant la lisibilité des caractères (à droite).

La police **Frutiger** est issue des travaux d’Adrian Frutiger [Frutiger 1999] pour la signalétique de l’aéroport de Roissy-Charles de Gaulle en France. Pour répondre aux besoins particuliers d’usage : lisibilité à distance, lecture rapide, affichage multi-langues, Frutiger développe un style à mi-chemin entre police linéale et humaniste, garantissant une identification maximale des caractères, même pour des distances et angles visuels importants. Il teste la robustesse visuelle des caractères en simulant le flou d’une vision distante. La haute qualité de la police de caractères résultante, *Roissy* (Figure 40 à gauche), est due à la fois à un travail important mené sur la conception du dessin de la lettre, avec un renforcement visuel des ouvertures du tracé ou de la jonction des traits, et l’usage de corrections optiques subtiles (Figure 40 à droite). Mais aussi à la création d’une typographie soigneusement équilibrée et esthétique par l’ajustement du contraste typographique, et une grande régularité des tracés et des espacements. Ce travail initial a conduit à la création de la police Frutiger qui a été utilisée pour la signalisation routière en France et en Suisse, et très largement pour l’édition et la publicité. De nombreuses créations numériques ultérieures s’inspireront de cette typographie. D’autres travaux pour la signalétique, comme HighWay ou ClearView aux États-Unis ont visé à accroître la lisibilité et améliorer la facilité de reconnaissance des textes de signalisation routière. ClearView a pour objectif de garantir la lecture des panneaux routiers en conduite de nuit [Holick 2006], en réduisant les effets de halo pour les conducteurs âgés et les conducteurs avec une sensibilité réduite de contraste.

La police **Verdana** de Microsoft [Verdana] a été créée en 1996 par Matthew Carter et Tom Rickner pour les instructions d’optimisation de l’affichage (*hinting*). Elle a été conçue spécifiquement pour maximiser la lisibilité du texte rendu sur écran avec une faible résolution. Verdana intègre, à cet effet, de nombreuses instructions spécifiques de hinting qui améliorent la rasterisation des caractères sur la grille de pixels, en corrigeant les effets de pixellisation indésirables du glyphe, en égalisant le rendu des primitives (par exemple l’épaisseur visuelle des fûts), ou en empêchant la disparition visuelle de parties du dessin dans le glyphe. Un travail important a également été fait sur la forme et la discrimination des caractères. L’une des qualités uniques de Verdana est la régularité de l’espacement (à l’intérieur et entre les lettres), qui produit une excellente lisibilité tout en maintenant une grande régularité et esthétique du texte et favorise la continuité et le confort de lecture.

La fonte **Tirésias** est l’aboutissement d’un projet de recherche mené par le Royal National Institut for Blind (RNIB) de Londres [Gill 2008]. Le projet a été initié afin d’améliorer la lisibilité des textes de sous-titrage pour la télé-

vision, utilisés pour favoriser l'accès des populations âgées et des personnes malentendantes et malvoyantes. L'étude a essentiellement porté sur la forme même des lettres (capitales et minuscules) et chiffres, avec pour objectif d'augmenter la discrimination visuelle entre caractères (voir Figure 41). Des tests expérimentaux ont été réalisés avec des sujets voyants ou présentant des déficiences visuelles.



Figure 41 : La fonte Tiresias conçue pour l'affichage des sous-titres de télévision.

L'aviation civile française a conduit un travail important de conception de fontes numériques pour les interfaces du contrôle aérien. Ce travail a abouti au développement d'un ensemble de polices de caractères bitmaps « ODS » et vectorielles « Bleriot » (cf. Figure 42), spécialement adaptées pour les interfaces graphiques ATC et notamment l'image radar des contrôleurs aériens. J'ai personnellement créé et développé l'ensemble de ces fontes. Les fontes ont été conçues pour garantir l'identification en contexte critique de données textuelles très spécifiques de l'ATC, mixant par exemple lettres et chiffres. Elles ont été validées en contexte expérimental par Eurocontrol [Jackson 2004] et en contexte opérationnel par des phases de tests menées dans les centres *en-route*. Elles ont été déployées et sont utilisées depuis 2000 dans l'ensemble des centres de contrôle aérien français et adaptées lors du basculement de technologie d'écran du CRT au LCD. Les fontes vectorielles *Blériot* ont été adaptées pour les besoins du cockpit et pour le système OIS (Onboard Information System) dans le cadre du programme Airbus A380.

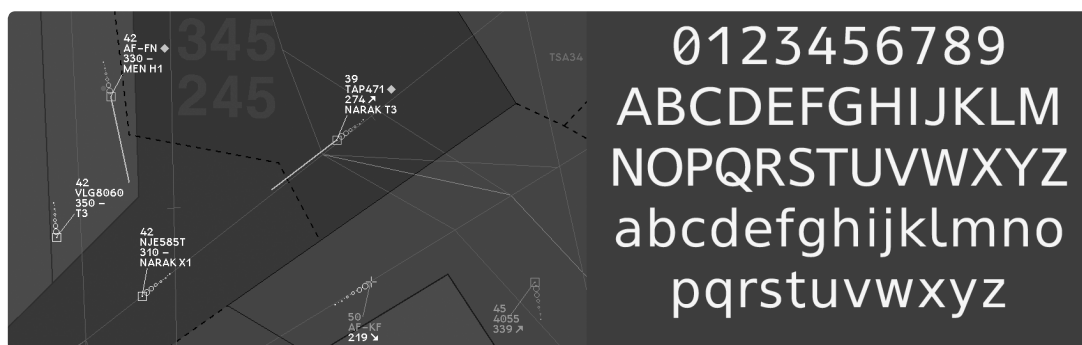


Figure 42 : Fontes DSNA, ODS (à gauche) et Blériot-radar (à droite)

2.2.3. Des exigences aux principes de design

En nous appuyant sur les besoins définis dans la phase initiale : analyse de l'activité et de l'existant technique, approche théorique, nous avons identifié un ensemble de sept exigences pour guider la conception et expliciter les principales questions et hypothèses de travail. Ces exigences réfèrent aux aspects typographiques traditionnellement définis par le concept de lisibilité : (legibility) lisibilité-discrimination des caractères et (readability) lisibilité-compréhension du texte. Certaines exigences plus techniques sont liées au

besoin de conformité aux caractéristiques actuelles des affichages écrans du poste de pilotage (comme la densité d'information).

2.2.3.1. Exigences

[R.1] Lisibilité-discrimination (legibility) : concerne plus précisément la forme et le rendu visuel de chacun des caractères. Tout spécialement pour des usages critiques et pour l'affichage de données spécifiques, chaque glyphe, même isolé, doit être discriminable des autres glyphes et parfaitement identifiable. Cette discrimination doit être possible en vision périphérique basse fréquence [Rubinstein].

[R.2] Performance de lecture : doit être garantie même pour des courtes durées de fixation visuelles et résister à de faibles degrés d'angle de vision (hauteur visuelle des textes) et à des distorsions angulaires (variation de l'angle de vision des écrans d'affichage).

[R.3] Robustesse : prévient l'usage en contexte et environnement visuel dégradés. Elle est nécessaire pour répondre par exemple aux variations du contexte lumineux entraînant une perte significative de contraste du texte. Dans un contexte graphique complexe, la lisibilité du texte doit résister à la superposition graphique à d'autres objets (fond, encadrement, image, carte...)

[R.4] Lisibilité-compréhension (readability) : résulte de l'ensemble du processus de présentation des informations textuelles sur l'interface graphique. La typographie favorise l'efficacité de la lecture à travers la cohérence et la régularité du texte : régularité des formes, du contraste, des proportions, des alignements, régularité des espacements et de la composition.

[R.5] Confort de lecture : assure une régularité visuelle des formes et des espacements. Il concerne tout spécialement la transition visuelle entre caractères, mots et lignes. Il est lié aux alignements visuels, et aux espacements des caractères de la chaîne de texte [McConkie 1975]. Il doit permettre une meilleure planification des saccades visuelles.

[R.6] Conformité opérationnelle : réfère à la capacité de garantir l'affichage des informations des écrans du cockpit, par exemple, la densité des informations ou la hiérarchie visuelle, les tailles et couleurs d'affichage des textes, ou l'alignement vertical strict des caractères numériques en fonction des données affichées. La typographie doit également intégrer un jeu de caractères étendu (charset) et spécifique aux informations du cockpit.

[R.7] Cohérence sémantique : implique que la police de caractères, doit refléter et être en harmonie avec le domaine d'application aéronautique et l'identité visuelle du produit. La typographie se doit de traduire par exemple les sens de modernité, de technicité, de fiabilité et de sécurité.

2.2.3.2. principes de design

Partant de ces exigences, nous avons défini un ensemble de 28 principes de design pour la conception typographique répondant aux exigences et classés en trois classes de propriétés. Nous en présentons ici quelques exemples :

- ➔ La forme de chaque caractère alphanumérique sera particulièrement différenciée de la forme des autres caractères avec lesquels il pourrait être visuellement confondu (R.1).

- La police devra strictement exprimer les primitives anatomiques de la lettre (en accord avec notre étude anatomique) pour garantir une bonne identification de caractères (R.1, R.2, R.3) .
- Les raccords de forme et jonctions entre primitives des lettres seront soigneusement spécifiés pour garantir la lisibilité du caractère à basse résolution et une haute performance de la lecture (R.2).
- L'alignement x-height de la police sera ajusté pour donner un bon contraste aux jambages des minuscules et améliorer la prédiction de texte dans la vision périphérique (R.1, R.2).
- Les caractères numériques doivent implémenter des formes spécifiques telles que le zéro barré, la forme ouverte du « 4 » ou une attaque marquée du « 1 », afin de s'assurer que les chiffres seront perçus comme une classe distincte de symboles et ne seront pas confondus avec les lettres majuscules (R.3) .
- Le contraste typographique (variation de l'épaisseur des traits de caractère) sera suffisant pour garantir l'unité de symbole et la robustesse au contexte graphique complexe (R.3).
- Le Kerning sera spécialement ajusté pour améliorer l'affichage des mots courts et des valeurs alphanumériques dans le respect des besoins aéronautiques (R.4, R.6) .
- La largeur de caractères sera soigneusement étroitiée, avec un paramètre de chasse compris entre normale et condensée, afin de garantir la densité du texte (R.6) tout en restant robuste à la distorsion angulaire (R.2).
- La largeur des caractères numériques sera strictement égalisée pour permettre l'alignement vertical des valeurs numériques (R.6) .
- Les polices devront intégrer des instructions de kerning pour garantir un bon rendu du texte pour les faibles et moyennes résolutions (R.2, R.5, R.6).
- La police sera à la fois visuellement esthétique et solide (entre humaniste et linéale) pour satisfaire les pilotes et être en harmonie avec la sémantique de l'aéronautique (R.5, R.7) .

2.2.3.3. Une phase de conception basée sur l'expérimentation

Les résultats de l'analyse initiale nous ont conduits à définir une approche multidisciplinaire du design typographique, guidée par la théorie et validée de façon itérative au travers d'un processus parallèle d'évaluations expérimentales. Ces expérimentations nous ont permis, à la fois, de vérifier nos principes et nos choix de design, d'explorer des plages de valeurs pour des propriétés et invariants typographiques et d'itérer le dessin des caractères. Elles nous ont enfin servies à tester, puis à valider dans un cadre opérationnel, les fontes numériques produites.

2.3. TypoAero : conception typographique et mise en œuvre du principe de continuité

L'objectif du projet était la fourniture d'un composant logiciel : une police de caractères aéronautique permettant la mise en œuvre efficace, efficiente et sûre des informations textuelles sur les écrans des futurs programmes avions.

Ce composant logiciel sera utilisé par les concepteurs des futures interfaces du cockpit, pour concevoir et développer les IHM de systèmes complexes et supporter des activités multiples et critiques. Les utilisateurs finaux de cette police de caractères (fontes embarquées dans les systèmes avions) seront les pilotes, personnels navigants commerciaux et opérateurs de maintenance. L'enjeu principal de la phase de conception d'un tel composant a donc été la création d'une typographie numérique adaptée aux besoins aéronautiques définis par le rapport d'analyse des besoins et des contraintes techniques. Ces besoins ont été déclinés en critères d'évaluation de l'utilisabilité et de recommandations au design.

→ *Maximiser la discontinuité visuelle, garantir la continuité de lecture*

Cette création typographique a visé à garantir à la fois la lisibilité-discrimination (*legibility*), c'est-à-dire permettre une bonne discrimination visuelle et une identification « absolue » des caractères, et la lisibilité-compréhension (*readability*), c'est-à-dire assurer graphiquement une régularité dans la structuration de l'information textuelle et la continuité de lecture. Ces niveaux de lisibilité doivent être maintenus *robustes* même pour des contextes d'usage dégradés (contextes lumineux, charge cognitive, stress, conditions de vol). Ce qui impose de traduire graphiquement ces contraintes en un style typographique cohérent, *harmonique* et esthétique (forme des tracés, contraste, proportions, empattement), pour favoriser le confort de lecture et diminuer la fatigue visuelle, et contribuer à la satisfaction de l'utilisateur.

La problématique qui nous est apparue comme centrale dans cette phase de conception correspond à une double exigence :

- **Maximiser** les distances perceptives entre formes des caractères, c'est-à-dire maximiser **la discontinuité visuelle** entre signes typographiques - en respectant les structures et primitives typographiques de la lettre.
- **Garantir la continuité de lecture** en respectant la régularité du tracé des formes et des espacements (principe d'une graphie homogène) et en permettant les transitions visuelles entre caractères, et la composition du texte.

2.3.1. Exploration des solutions

À partir de l'analyse des besoins et des contraintes techniques, nous avons exploré les solutions techniques et typographiques permettant de répondre aux critères ergonomiques retenus, notamment de lisibilité : discrimination et identification.

Une première étude des fontes existantes « lisibles » nous a permis de construire un référentiel de formes et propriétés typographiques.

2.3.1.1. Anatomie comparée de polices de caractères lisibles

Nous avons tout d'abord procédé à une comparaison morphologique de polices de caractères spécialement conçues pour maximiser la lisibilité des textes, afin d'analyser comparativement les formes et propriétés des caractères alphanumériques. Nous avons sélectionné un ensemble de typographies candidates

et réalisé des images formées par la superposition visuelle d'un ensemble de caractères alphanumériques. Les caractères choisis, rendus avec des paramètres équivalents, ont été visuellement superposés sous la forme de couches graphiques transparentes.



Figure 43 : Superposition de 36 glyphes alphanumériques de 10 fontes « lisibles »

La Figure 43 montre la superposition de 36 glyphes (lettres capitales + chiffres) de 10 fontes numériques. Ces fontes sont : l'*Univers*, le *Frutiger*, l'*Helvetica Neue*, le *Vera Sans*, le *Verdana*, le *Lucida Sans* et le *Lucida Grande*, le *Myriad Pro*, le *Calibri*, le *Tirésias PC* et le *Blériot OIS*. Ces typographies ont été spécifiquement conçues pour favoriser la lisibilité des caractères. La plupart d'entre elles (hors l'*Univers*) ont été spécialement développées pour un usage numérique et pour un affichage sur écran des caractères favorisant la rastérisation des caractères et la lecture des textes même pour des faibles résolutions.

La superposition visuelle des glyphes montre une très grande similitude globale des formes. Concernant le ratio hauteur largeur, la courbure des panses ou l'ouverture des lettres capitales, les fontes *Frutiger*, *Verdana*, *Myriad*, *Lucida Sans*, *Lucida Grande*, *Bleriot* et *Calibri* sont presque identiques. Il faut noter également une quasi-égalité de valeurs des invariants typographiques de graisse et de chasse de ces polices



Figure 44 : Variations de design des caractères « J », « R », « Q », « 3 ».

De plus grandes variations existent dans le dessin de certains caractères qui correspondent à des choix de design (cf. Figure 44). La lettre capitale « J » par exemple présente des variations de dessin du *jambage* inférieur qui peut descendre sous la *ligne de base* (*Lucida Grande*) ou présenter une simple goutte basse jusqu'à un large retour ascendant. La lettre « R » présente 2 formes très typées du *jambage* droit, d'une forme rectangularisée se terminant presque

verticalement à une oblique prononcée du jambage. Le dessin de *queue* de la capitale « Q » est également assez variable, avec une forme plus ou moins longue et marquée et même s'arrondissant en boucle pour la Blériot.

Pour les chiffres, le « 1 » est surtout différencié par l'orientation (de horizontal à 45° environ) et la longueur de la traverse en haut à gauche et la présence d'un « empiètement » rectangulaire à la base. Cet empiètement se retrouve en haut et en bas de la lettre « I » des fontes Verdana, Vera Sans et Tirésias. Pour le « 8 », le choix de design se porte sur l'importance d'accentuation du croisement central en « X ». Le choix de design est marqué de façon plus importante pour les chiffres « 3 » et « 4 ». La boucle supérieure du « 3 » des fontes Tirésias et Blériot (Figure 44) a été remplacée par un angle à 45° formé par une diagonale de raccord à une traverse horizontale à hauteur de capitale. Le « 4 » à l'anglaise de ces fontes a également été fortement ouvert : le fût vertical à droite étant remplacé par un croisement vertical plus court de la traverse inférieure. Enfin, le chiffre « 0 » présente ou non une forme centrale, barre diagonale (Blériot) ou point (Vera Sans) pour le différencier des lettres rondes « O » ou « Q ».

Pour notre projet de conception d'une typographie aéronautique, nous avons dû garantir la meilleure lisibilité des signes (discrimination, identification) et donc choisir un design adapté à cette exigence. La Figure 45 présente quelques exemples de dessins favorables. Ces formes, « 0 » barré ou ouverture haute du « 4 » par exemple, ne doivent pas diverger trop de la forme « classique » et de l'expérience des pilotes (CDS). Ainsi la forme « angulée » du haut du « 3 » utilisée par les polices Tirésias et Blériot a été jugée trop particulière et moins adaptée que le dessin classique à deux boucles. Nous devons plutôt rechercher une adaptation (renforcement) des formes, en restant sur des bases graphiques « connues », pour produire un rendu visuel discriminant des caractères. Par exemple en renforçant visuellement la caractérisation du chiffre « 1 » par une attaque marquée et suffisamment longue, par le renforcement de la queue du « Q » ou par l'ajout de courbes de liaison au bas des minuscules « l » ou « t ».



Figure 45 : Choix de formes facilitant la discrimination des caractères

Le gabarit plutôt étroit des lettres pour répondre aux besoins de densité d'information des IHM du cockpit et les tailles de rendu sont également à prendre en compte, par exemple les branches centrales du « W » peuvent difficilement être croisées, les angles quasi orthogonaux sont à éviter et les fûts du « M » seront mieux rendus verticalement, enfin, le dessin des minuscules doit être simplifié et garantir des contreformes de tailles suffisantes.

En conclusion, la proximité de formes mais aussi de valeurs des principaux invariants typographiques (graisse, chasse) de ces polices, nous a permis de les considérer comme très pertinentes pour notre conception typographique et comme valeurs de référence pour notre exploration expérimentale des propriétés de police. Néanmoins, indépendamment de leurs qualités, aucune de ces polices n'a paru satisfaire l'ensemble des exigences définies lors de l'analyse du besoin, notamment en ce qui concerne la conformité aux exigences de composition des informations cockpit (densité, alignements verticaux, ...)

2.3.1.2. Augmenter la discrimination en vision basse fréquences

2.3.1.2.1. Améliorer la prédiction en vision périphérique

Comme relevé dans la section 2.2.2.1.3, la diminution de la résolution spatiale à partir du centre de la fovéa [Nazir 1992] peut être assimilée à un changement de sensibilité aux fréquences spatiales : la partie centrale de la fovéa détecte les hautes fréquences tandis que la partie périphérique n'est sensible qu'aux basses fréquences. En termes de formes de lettres, cela se traduit par une détection de la forme générale des lettres perçues en périphérie et une détection des détails de la lettre perçus en zone fovéale.

Dans notre contexte de besoin, avec des temps de fixation courts et un type de données très spécifique, mais aussi pour des contextes dégradés (par exemple lumineux), les caractères à concevoir doivent être distinguables entre eux sur la seule base des informations perçues en basse fréquence. Ces informations « basses fréquences » doivent également permettre une bonne prédiction des caractères en vision périphérique, même pour un contexte textuel défavorable. La vision précise des glyphes en vision centrale devant quant à elle garantir l'identification absolue des signes typographiques composant l'information textuelle.

Nous avons testé cette capacité de bonne restitution « sémantique » des formes typographiques dans le cadre d'une vision basse fréquence.

2.3.1.2.2. Effets visuels de l'application d'un flou gaussien

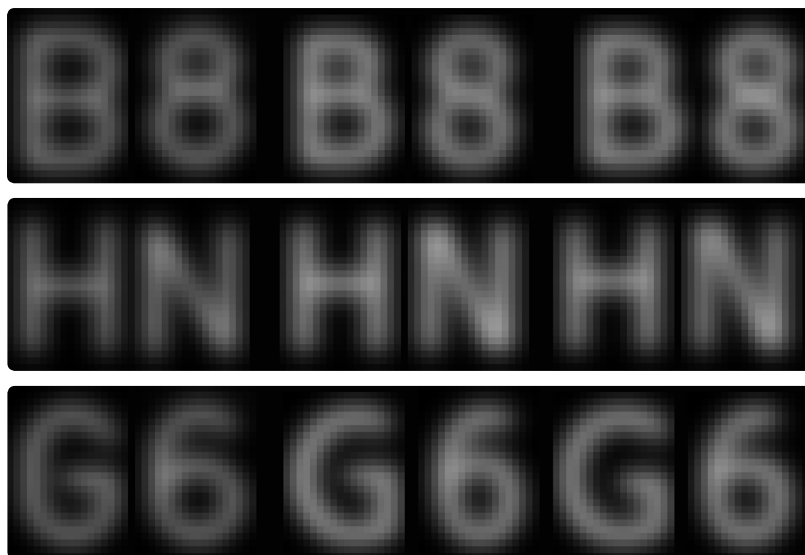


Figure 46 : Application d'un flou gaussien sur des glyphes CDS, Blériot et Verdana

La Figure 46 montre l'application d'un flou gaussien sur des paires de glyphes pour les fontes CDS, Bleriot OIS et Verdana. Les 3 paires, « B » et « 8 », « H » et « N », « G » et « 6 » sont des exemples connus de paires de caractères aux formes assez proches et pouvant être l'objet de confusions visuelles.

L'application du flou gaussien entraîne des pertes de contraste plus sensibles pour des caractères de moindre graisse comme ceux de la fonte CDS, la couleur de surface (détail) du caractère, portée par des formes moins épaisses, est moins « protégée » de celle du fond. De plus, les éléments caractéristiques des lettres et chiffres sont affectés par cette dégradation qui diminue la distance visuelle entre glyphes. La Figure 47 montre une même application de flou

gaussien sur les lettres « D », « Q » et « O » de la fonte CDS. Le problème de similitude vient d'une faible robustesse visuelle pour la fonte CDS des primitives : *fût* et *panse* du « D » ou *queue* du « Q » dans le contexte de formes trop « rectangulaires » avec des faibles courbures (rayon de raccord angulaire) des panses, surtout du « D », et d'une *queue* trop courte du « Q ».

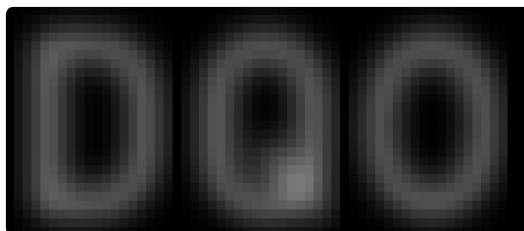


Figure 47 : Application d'un flou gaussien sur les glyphes D, Q et O de la fonte CDS

Les égalités de largeur visuelle des caractères accentuées par l'espacement monospace de la fonte diminuent la distance entre formes comme le montre la paire « G » et « 6 » de la fonte CDS sur la Figure 46. Une différenciation globale des chiffres pourrait être une solution : si cette paire et celle des « B » et « 8 » de la fonte Bériot résistent mieux visuellement que les paires CDS correspondantes, une augmentation de la casse du « B » de la Blériot augmenterait la discrimination.

2.3.1.3. *Discontinuité graphique : un concept de design pour garantir la lecture en contexte dégradé*



Figure 48 : Trois techniques graphiques utilisées dans le projet pour renforcer la lisibilité : Incises, Light Traps et Crossings

2.3.1.3.1. Un besoin graphique de discontinuité visuelle

Notre « besoin » graphique primordial est de produire de la discontinuité visuelle, autrement dit, d'augmenter la différence visuelle entre les lettres en exprimant visuellement leur spécificité de forme. Ceci se traduit très concrètement par une différenciation visuelle des formes, primitives de tracé et raccords entre primitives. Un premier besoin est de différencier les formes entre raccords orthogonaux (marqués par des angles droits), et courbes. Le deuxième est de renforcer la lisibilité des « creux » visuels formés par certains raccords du tracé (par exemple le raccord haut du « A »). Le troisième est de mieux exprimer le croisement de tracé (par exemple des diagonales du « X »). La Figure 48 présente trois techniques que nous avons conçues et mises en œuvre pour le design typographique : l'utilisation d'incises, la création de pièges à lumière (Light Traps) et de décalage visuel au croisement (Crossings).

Nous présentons ci-après plus en détail, la mise au point du concept d'augmentation de la caractérisation visuelle du tracé par l'utilisation d'incises.

2.3.1.3.2. Le principe de l'utilisation d'incises pour discriminer la forme

Un certain nombre de caractères présentent visuellement des angles, souvent droits, correspondant au raccord visuel entre deux primitives : deux segments de droites, par exemple un fût vertical et une traverse horizontale comme l'angle haut gauche du « E », ou le raccord entre une primitive «droite» et une panse, comme l'angle haut gauche du « B ». L'un des problèmes majeurs posés à la discrimination des caractères et devant permettre une meilleure prédiction en vision périphérique, est de mieux marquer la différence graphique entre fût et panse et plus précisément d'augmenter visuellement la distinction entre les angles (ou *pointes*) formés par les raccords de primitives « droites » : *fûts*, traverses ou diagonales ou entre une droite et une courbe, et les tracés plus curvilignes des panses, boucles ou gouttes. De plus, pour une fonte de petite taille, la rastérisation des caractères sur la grille de pixels tend à ajouter du flou à la forme (antialiasing) et à arrondir les formes visuelles.

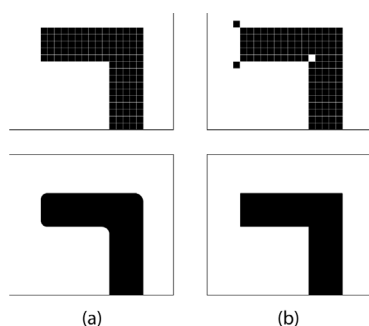


Figure 49 : Amélioration du rendu par la technique du Half Biting, l'ajout ou le retrait d'un pixel aux angles des formes améliore le rendu visuel

Dans son ouvrage *Digital Typography* [Rubinstein 1988] (pp79-80), Richard Rubinstein présente l'utilisation de la technique de « Half Biting » pour améliorer le rendu des textes imprimés (imprimante laser). La Figure 49 illustre l'usage de cette technique du Half Biting pour améliorer le rendu des angles sortants et rentrants de la forme. La forme standard (a) en haut à gauche, imprimée par le carbone sur le papier, produit un rendu du glyphe arrondissant les angles (en bas à gauche), la forme augmentée avec le Half Biting ajoute des pixels noirs à l'extérieur de la forme (à 45°) pour les angles sortants et en supprime un à l'intérieur de la forme pour l'angle rentrant. Le résultat en bas à droite est visuellement plus conforme à la forme originale.

ABCDE

Figure 50 : La police Optima demi-bold d'Hermann Zapf

Une augmentation du marquage des angles et des jonctions peut être réalisée par l'utilisation d'empattements (sérifs) de type *incise*, compatible avec le dessin des linéales. Cette forme renforcée des angles peut être réalisée par un épaississement des extrémités, comme dans le dessin des polices « Optima » ou « Alinea », ou par la création de légers empattements triangulaires (incises). La Figure 50 montre l'effet rendu par l'incise lors de la rastérisation, qui, avec l'antialiasing du texte, produit un léger élargissement visuel des extrémités des fûts du « B », « D » et « E ». La courbure des panses doit parallèlement

être visuellement plus marquée, c'est-à-dire différenciée d'avec les angles. Les courbes doivent donc être assez « pleines » (sans aplatissement central) et d'un rayon de tracé suffisant, contrairement aux formes rectangularisées des caractères CDS.

2.3.1.3.3. Augmenter la discontinuité des rendus visuels

La Figure 51 présente un premier essai d'amélioration de la discrimination visuelle entre les caractères « B » et « 8 ». Pour l'image de gauche, la colonne tout à gauche (en gris) présente le dessin des caractères dans la fonte Verdana, celle de droite un principe de dessin des formes pour les 2 caractères. La modification de formes du « B » consiste en un « arrondissement » des courbes augmentant la lisibilité des panses, et la création d'un empattement court, de type incise, qui renforce la caractérisation du fût et des angles fût-traverse. Le « 8 » a été également légèrement modifié : diminution de la boucle supérieure, arrondissement des courbures, et croisement central plus marqué.



Figure 51 : Modification des formes du « B » et du « 8 » pour améliorer la discrimination visuelle des caractères.

L'image de droite présente le résultat visuel des rendus des deux formes modifiées du « 8 » et du « B », en appliquant un flou gaussien sur les glyphes rastérisés pour une résolution de rendu correspondant aux besoins d'affichage du CDS (hauteur capitale de 21 pixels de la fonte T2). L'effet visuel généré par l'incise du « B » modifié (antialiasé), augmente le rendu de la verticalité du fût en contrastant les extrémités et les angles supérieurs et inférieurs. Pour le « 8 », la visibilité du pincement central est plus marquée. Les glyphes des deux lettres modifiées paraissent visuellement plus différenciés que les glyphes des lettres originales (cf. Figure 46).

2.3.1.4. Organiser la régularité typographique pour favoriser la continuité de lecture

Le principe de discontinuité graphique a fondé notre conception formelle (de la forme) des différents signes typographiques, dans le but de garantir la lisibilité-discrimination et l'identification « absolue » de chaque caractère dans des contextes d'usage dégradés. De façon symétrique, le principe de continuité est intrinsèque à la conception et aux techniques de création typographique. L'organisation de régularités structurelles et perceptuelles — d'alignement, de tracé, de liaison et d'espacement — du dessin et des métriques embarqués dans la typographie, favorise la continuité de lecture et la lisibilité-compréhension du texte.

2.3.1.4.1. Moyens typographiques de la continuité : orientation d'outil et régularité de tracé

Les exigences de densité des informations pour les IHM cockpit imposent une chasse moyenne plutôt étroite des caractères. Le gabarit actuel des caractères

de la fonte CDS (à espacement non proportionnel) correspond à un ratio largeur/hauteur de 7/10. Le *contraste* typographique de la fonte CDS actuelle est nul (égal à 0), c'est-à-dire présentant un tracé de lettre d'épaisseur constante. Un léger *contraste* avec une variation d'épaisseur entre plein et délié, en fonction de l'orientation du tracé est nécessaire pour mieux caractériser les primitives. Nous avons choisi, en accord avec les corrections optiques, d'élargir les fûts, mais aussi de conserver une épaisseur suffisante des traverses pour « exprimer » le noir du texte avec plusieurs pixels.

La création typographique est toujours le résultat de l'action du tracé de la lettre à l'aide d'un outil physique (burin, calame, plume, pinceau) sur un support. Les variations des formes visuelles des caractères typographiques que nous utilisons aujourd'hui et dont nous avons l'expérience ont pour la plupart été générées et précisément définies par cette action d'écriture *calligraphique*. Cette spécification des formes par l'action régulière de déplacement (moteur) d'un même outil a pour effet de générer un tracé d'une grande régularité visuelle. Chaque partie de lettre tracée avec l'outil et correspondant à une même posture gestuelle présentera une trace similaire. Deux traits verticaux, ou deux traits inclinés avec une pente identique, ou deux courbes dessinées identiquement dans le tracé de lettres différentes, présenteront ainsi une forme similaire. Ceci permet de réaliser un jeu de caractères, basé sur un ensemble limité de primitives graphiques, présentant une forte continuité visuelle des formes, notamment pour une forme asymétrique d'outil, et aidant au passage visuel (lecture) d'un caractère aux caractères suivants (saut oculaire et prédiction de lecture en vision périphérique). La Figure 52 présente le concept de composition des primitives que nous avons retenu, généré à partir d'une forme d'outil rectangulaire orientée à 20°, pour le dessin des fûts, traverses et panses. Elle montre aussi le principe de dessin des diagonales qui modifie l'orientation de l'outil pour affiner certaines formes.

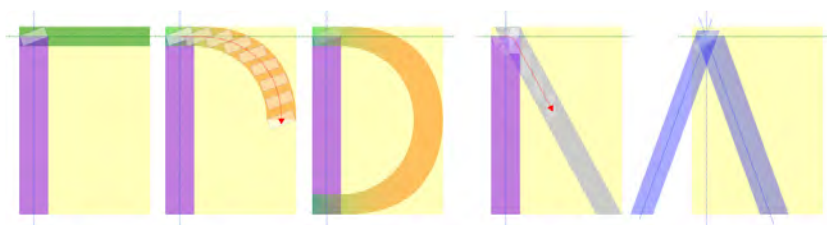


Figure 52 : Angle de tracé et création calligraphique des primitives de la lettre : fûts, traverses, panses et diagonales

2.3.1.4.2. Structure visuelle continue : définition des alignements

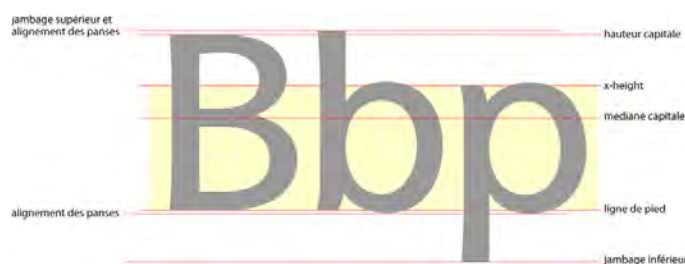


Figure 53 : Spécification des alignements typographiques de la fonte prototype

La continuité de lecture est également favorisée par la régularité de composition des lettres, et assurée par la mise en œuvre des alignements typographiques. La Figure 53 présente la définition des principaux alignements de la lettre pour la fonte prototype : la hauteur d'alignement des bas-de-casse

(*x-height*) est modérée, à 70% de la hauteur capitale. Ce ratio est volontairement inférieur à celui de la Frutiger et très inférieur à celui de la Verdana pour augmenter la lisibilité des jambages des textes en minuscules. La ligne médiane des capitales (ligne visuelle de la traverse centrale du « B » ou du « E » par exemple) est légèrement rehaussée (52,5%) pour équilibrer visuellement les lettres. L'alignement du jambage haut dépasse légèrement la hauteur capitale et le jambage bas est plus court que celui-ci. Une ligne d'alignement des panses décalée permet la correction optique des formes.

La nécessité de caractériser visuellement les chiffres et de favoriser leur alignement vertical nous a conduits à privilégier une chasse quasi homogène des 10 caractères numériques.

2.3.2. Premières créations typographiques d'une fonte TypoAero

2.3.2.1. Études typographiques : principes de forme et style

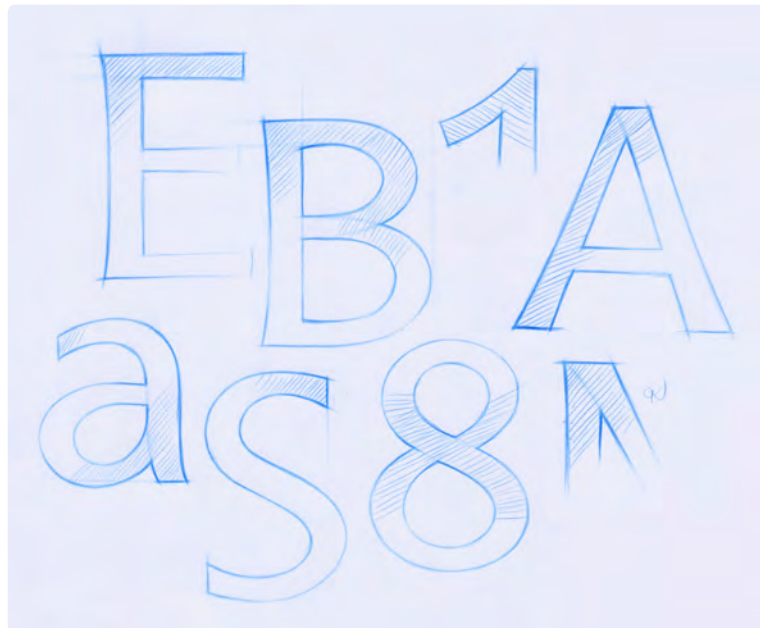


Figure 54 : Premières études de formes pour la police prototype

La Figure 54 présente l'image scannée d'un des dessins d'étude (roughs) réalisés pour la conception du style typographique de la nouvelle police. Cette phase d'exploration calligraphique avec dessin sur papier est indispensable pour concevoir les principes du dessin typographique (forme et style) et l'esthétique de la lettre.

Nous sommes partis du tracé très équilibré de polices modernes et lisibles comme la Frutiger, compromis typographique entre polices linéale et humaniste, pour explorer une calligraphie plus souple et plus contrastée (épaisseur sensible à l'orientation du trait), et intégrant de légers empattements triangulaires de type incise pour augmenter visuellement les extrémités verticales des fûts. La difficulté de ce choix de design réside dans l'équilibre visuel de cette fusion et dans le compromis nécessaire du dessin entre la fonction première attendue de performance (lisibilité) de composants pour l'affichage numérique d'informations critiques dans le cockpit ; et la *nécessité* esthétique et de cohérence métier d'une typographie devant répondre à la satisfaction des utilisateurs et au contexte d'usage aéronautique (besoins marketing d'Airbus.

2.3.2.2. Mise en forme vectorielle

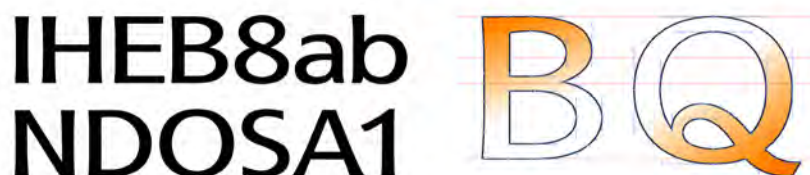


Figure 55 : Étude de vectorisation sous Illustrator, transcription vectorielle du style, empattement, courbures et attaques.

La Figure 55 illustre l'étude de vectorisation de la fonte de référence (Regular) réalisée à partir des dessins papier. La création du *fût* pour le « I » permet de traduire géométriquement l'élargissement d'empattement de type incise des extrémités et d'en vérifier le rendu à la rasterisation. Cette première vectorisation produit visuellement une certaine lourdeur des hampes dont le dessin est à retravailler. Les variations du « H » et du « E » règlent les rapports de chasse et l'épaisseur des traverses. Le dessin du « E » permet de préciser l'équilibre visuel de la « médiane » capitale et les corrections d'alignement des 3 traverses.

L'étude du caractère « B » issu de la composition du « E » a été très importante pour concevoir le dessin précis des *panses* et le raccord avec le *fût*. La Figure 55 (à droite) montre les points de contrôle des segments cubiques de Bézier des tracés du « B » et du « Q ». La forme du « 8 » est réalisée en « contraste » avec celle du « B » suivant les principes définis en 2.4. Le dessin des minuscules « a » et « b » permet d'instancier les proportions et les alignements des caractères bas-de-casse et de régler le principe des *fûts* et *panses* des caractères minuscules ainsi que d'affiner la conception des jonctions.

La formalisation du dessin des caractères suivants a permis de compléter l'étude des primitives : diagonales du « N » et surtout du « A » qui caractérisent les épaisseurs des obliques selon leur orientation. Enfin, les tracés des lettres capitales « D » puis « O » qui spécifient la courbure de la pleine panse, et celui du « S » qui modélise les ouvertures en *gouttes* des extrémités.

2.3.2.3. Premier prototype logiciel

ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ
1234567890

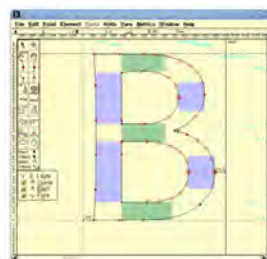


Figure 56 : L'alphabet finalisé des lettres capitales et chiffres du prototype (à gauche), création de la lettre capitale « B » et de ses hintings avec FontForge (à droite).

L'étape suivante a consisté à finaliser, à partir de ces premières modélisations, l'ensemble des définitions vectorielles des lettres capitales et des chiffres de la future fonte. La « déclinaison » a été réalisée méthodiquement, en respectant les primitives et les recommandations au design décrites en 2.2.3.2 pour discriminer les formes des caractères. La réalisation a permis de compléter les lettres capitales à panses puis les capitales à primitives « droites ». Enfin, le tracé des chiffres a été complété en respectant une chasse fixe de ces caractères pour favoriser l'alignement en « tableau » des valeurs numériques.

La Figure 56 (à gauche) présente l'alphabet finalisé des lettres capitales et des chiffres de ce premier prototype. Nous avons réalisé une première implémentation logicielle avec FontForge¹⁰, un logiciel libre d'édition de fonte. Ce logiciel permet de créer des typographies avec un assez bon niveau de qualité, des fonctionnalités étendues de métriques (hinting ou kerning par exemple) et la prise en compte de multiples formats de fontes. La création graphique initiale des caractères a été réalisée en important les images vectorielles SVG des caractères créés avec Illustrator. La Figure 56 (à droite) présente la création de la lettre capitale latine « B ». Certains hintings ont été générés automatiquement puis affinés manuellement. Les rectangles de couleur verte (horizontal) et bleue (vertical) visualisent les hintings de conservation des épaisseurs visuelles dans la fonte (ici traverses et fûts).

2.3.2.4. Réalisation des glyphes de test



Figure 57 : Jeu bitmap de glyphes des caractères alphanumériques rastérisés pour une hauteur capitale de 19 pixels, détail du « B » (à droite).

Ce premier prototype nous a permis de générer des jeux de glyphes de test pour la fonte TypoAero (cf. Figure 57). Ces jeux intègrent l'ensemble des caractères alphanumériques et sont de résolutions identiques (hauteur capitale) aux tailles des fontes CDS. Ces glyphes seront utilisés lors des expérimentations pour comparer les fontes et évaluer le design.

Nous avons également réalisé avec Photoshop un exemple d'implémentation de la fonte prototype sur la copie d'écran d'une page FMS. Ce test nous a permis d'évaluer rapidement l'affichage des informations réelles avec les nouveaux caractères, et de vérifier la rastérisation, la compatibilité avec la densité du texte, l'effet de luminance produit et la portance de la couleur d'état.

2.3.3. Un processus de design centré expérimentation

À partir de ce premier prototype, nous avons développé un processus itératif de conception basée sur l'expérimentation. Ces expérimentations avaient pour but :

- d'évaluer la performance de lecture en contexte dégradé pour valider les concepts de design, préciser les formes, et produire des métriques de discrimination et d'identification des caractères.
- de tester l'impact d'une variation de valeur de certaines propriétés ou invariants typographique, dans le but d'identifier les valeurs de propriété des invariants typographiques, valeurs optimales, mais aussi plages possibles de paramétrage.
- de comparer les fontes prototypes aux fontes existantes, en contexte opérationnel et avec des affichages réalistes, afin de qualitativement mesurer le confort et la qualité de lecture des nouvelles fontes et leur adéquation aux interfaces aéronautiques.

¹⁰ Fontforge est un éditeur de polices de caractères libre (licence BSD) <http://fontforge.org/>

Ces évaluations expérimentales ont été réalisées successivement dans un cadre de laboratoire, puis dans un environnement de type cockpit. Les expérimentations en laboratoire, dans un contexte plus contrôlé, ont permis de mesurer les performances des fontes en termes de lisibilité-discrimination des caractères en contexte visuel dégradé. Les tests ont porté d'abord sur la lecture de caractères isolés, puis sur de formes textuelles plus complexes. Les expérimentations en environnement cockpit ont été réalisées sur simulateur avion (A350) et pour des contextes plus opérationnels. Les tests ont permis de vérifier les résultats obtenus en contexte laboratoire puis de tester qualitativement les prototypes dans des conditions et pour des affichages plus opérationnels.

Le prototypage de la police a été itéré, modifié et complété, après chaque expérimentation en fonction des résultats obtenus. Les modifications portaient à la fois sur le dessin particulier de certains caractères, mais aussi sur un «tuning» des propriétés globales de forme et des métriques de la fonte.

Nous rapportons ci-après trois expérimentations, parmi celles réalisées, qui représentent chacune l'un des trois types de besoins expérimentaux.

2.3.3.1. Expérimentation 1 : évaluer la lisibilité-discrimination

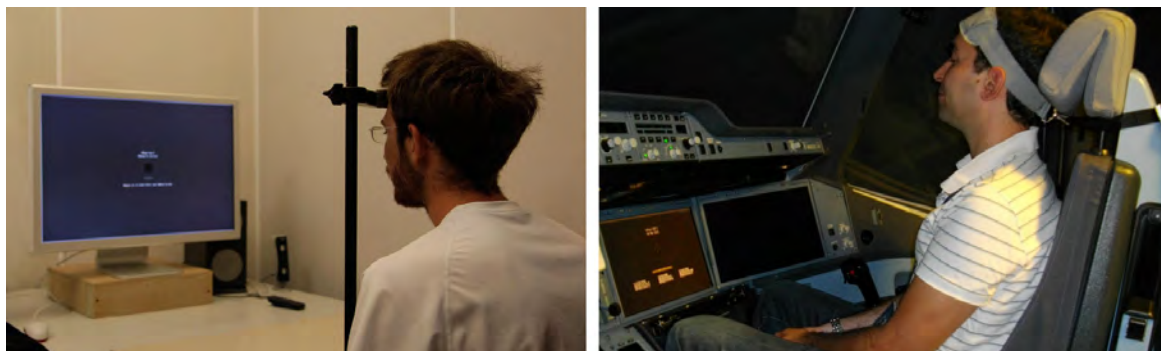


Figure 58 : Dispositif expérimental des expérimentations de type 1, en contexte laboratoire (à gauche), en contexte cockpit (à droite).

L'objectif de ce premier type d'expérimentation était de positionner notre prototype en termes de lisibilité et de discrimination de caractère. Nous avons donc comparé la police de référence du cockpit (CDS), une police connue pour sa très bonne lisibilité (Verdana) et notre police prototype (TypoAero). Afin de renforcer le rôle joué par les composantes basses fréquences dans la reconnaissance de caractères, les stimuli ont été présentés avec un très faible contraste entre couleur des caractères et couleur de fond. Ce contraste a été adapté pour chaque sujet à l'aide d'un pré-test d'acuité visuelle.

2.3.3.1.1. Dispositif et protocole expérimental

Cette première expérimentation a été réalisée plusieurs fois, dans un cadre de laboratoire avec des sujets non pilotes, puis dans un environnement cockpit avec des pilotes (cf. Figure 58). Les résultats de ces expérimentations sont très similaires, avec quelques variations principalement issues des évolutions du design ou de tests de formes alternatives introduites dans le dessin de certains caractères. Nous présentons ici les résultats de la première session expérimentale, réalisée en contexte de laboratoire.

Douze sujets, âgés de 21 à 47 ans et ne présentant pas de déficience visuelle, ont participé à cette expérimentation. Les sujets étaient assis face à un écran sur lequel les stimuli étaient affichés. La disposition nominale (distance et orientation) par rapport à l'écran correspondait à celle du cockpit, à savoir 80 cm et face au centre de l'écran (distance à l'écran PFD/ND), et 100 cm (distance à l'écran ECAM). La position visuelle relative du sujet était maintenue à l'aide d'un dispositif d'appui frontal et vérifiée pour chaque séquence de test¹. L'écran utilisé pour l'expérimentation était un écran LCD 30" Apple *Cinema HD Display*. Caractéristiques techniques de la dalle : technologie TFT, **rétroéclairage** à tubes fluorescents, rapport W/H 16/10, résolution 2560 x 1600, temps de réponse 14 ms, pas de pixel (pitch) 0.250 mm, luminosité 400 cd/m², taux de contraste 700 : 1.

■ Tâche expérimentale

Les sujets devaient nommer un caractère alphanumérique affiché avec un temps limité sur l'écran. Chaque caractère présenté devait être nommé à voix haute par le sujet tandis que l'expérimentateur notait la réponse.



Figure 59 : Les stimuli des 3 fontes testées avec leurs 36 glyphes alphanumériques.

Les stimuli présentés étaient les 36 caractères alphanumériques (26 lettres majuscules et 10 chiffres) de trois fontes différentes : CDS, Verdana et une première version prototype de la fonte TypoAero en cours d'élaboration (cf. Figure 59). La taille d'affichage des lettres était de 4.75mm (19 pixels de hauteur). Les angles visuels des caractères étaient de 20.41 minutes d'arc à la distance de 80 cm et de 16.33 minutes d'arc à la distance de 100 cm et correspondaient aux angles visuels de la fonte CDS « T3 » utilisée par Airbus : 20.17 au centre de l'écran PFD et 16.08 au centre de l'écran ECAM. Le premier angle visuel (20.41) correspond aux valeurs recommandées par la norme européenne « EN 894-2 » tandis que le deuxième (16.33) n'est considéré que comme acceptable.

Chaque présentation d'un caractère alphanumérique constituait un essai. Un essai commençait donc par l'affichage d'un point de fixation au centre de l'écran pendant une durée de 700 ms. Ce point disparaissait, puis un caractère alphanumérique apparaissait pendant 17 ms (34 ms pour les expérimentations en contexte cockpit) à l'emplacement du point de fixation. Le sujet devait alors nommer le caractère qu'il avait perçu. Après une durée de 200 ms sans affichage à l'écran, le point de fixation apparaissait à nouveau, signalant ainsi le début de l'essai suivant. L'ensemble des essais correspondant à l'affichage successif de tous les caractères alphanumériques d'une fonte donnée, soit 36 affichages, à une distance donnée (80 ou 100 cm) constituait un bloc. Chaque sujet devait passer 2 blocs pour chaque condition, soit 2 × 3 fontes testées × par 2 distances (80 et 100 cm), soit un total de 432 essais.

1 L'expérimentation sur simulateur avion a été réalisée avec un affichage des stimuli sur les écrans réels du cockpit et avec un réglage et fixation de la position visuelle - angle conforme à la position pilote normalisée et distances 80 et 100 cm - effectué à l'aide du siège pilote (réglage électrique de la position et bandeau de maintien).

L'ordre de présentation des caractères était pseudo-aléatoire à l'intérieur d'un bloc tandis que l'ordre de passation des blocs était contrebalancé sur l'ensemble des sujets. La moitié des sujets ont commencé par la distance de 80 cm tandis que l'autre moitié a commencé par 100 cm.

■ Adaptation du contraste : pré-test d'acuité visuelle

Pour chaque sujet, la séance commençait par la passation d'un test permettant d'ajuster la valeur du contraste entre le caractère affiché et le fond. En effet, une valeur de contraste suffisante pour permettre une identification des lettres sans aucune erreur ne livre pas d'information sur la confusion possible entre les caractères. Pour chaque sujet, la valeur du contraste choisie correspondait à une région ne permettant pas l'identification à coup sûr. Le test consistait à présenter, à la distance la plus grande (100 cm) un cercle d'un diamètre de 4,75 mm correspondant à la taille des caractères à tester, et comportant une ouverture orientée en haut, en bas, à droite ou à gauche (anneaux de landolt). Le sujet devait donner l'orientation de l'ouverture en appuyant sur la touche correspondante sur un clavier d'ordinateur.

Le test commençait par une valeur de contraste confortable, puis cette valeur diminuait à chaque essai pour finir dans des valeurs de contraste ne permettant pas la perception de la forme affichée. Cette première série (20 essais avec une valeur de contraste qui diminuait) était suivie d'une seconde série repartant de la dernière valeur de contraste (indiscernable) pour finir à la première valeur de contraste (confortable). Quand le sujet ne pouvait pas donner de réponse raisonnable, il appuyait sur la barre espace. Au regard des résultats (voir les résultats d'un sujet sur la Figure 60), une valeur de contraste était choisie dans la zone entre le « sans-faute » et « le « non perçu », testée avec une première série de tests et ajustée si besoin.

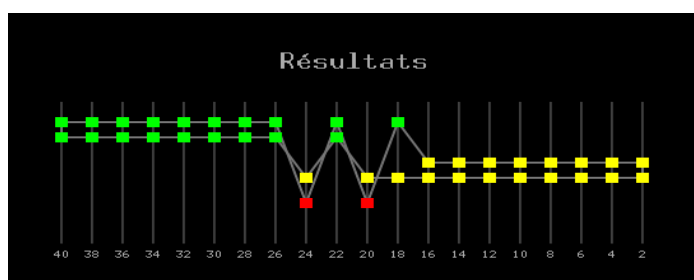


Figure 60 : Résultats du test d'ajustement de la valeur de contraste (sujet 5).

Une fois la valeur de contraste décidée, le sujet passait une série de 6 essais dans les conditions de l'expérimentation afin de se familiariser avec la tâche. Les caractères présentés étaient issus des trois fontes testées. Les réponses du sujet lors de ces essais n'étaient pas incluses aux résultats expérimentaux.

■ Variables indépendantes

Les variables indépendantes étaient les fontes (3) et les distances œil-écran (80 et 100 cm).

■ Variables dépendantes

Il n'y avait qu'une seule variable dépendante, la réponse du sujet. Cette variable discrète pouvait avoir 3 valeurs : BR (Bonne Réponse), MR (Mauvaise Réponse) ou NR (Non-Réponse). Les bonnes et mauvaises réponses correspondent à l'identification, exacte ou non, du caractère alphanumérique

présenté sur l'écran et nommé par le sujet. Quand le sujet ne pouvait pas fournir de réponse (verbalisée par exemple sous la forme « non » ou « rien »), nous l'avons notée comme une non-réponse.

2.3.3.1.2. Résultats expérimentaux

■ Avertissement au lecteur

Il faut rappeler que ces résultats correspondent à un protocole de test en contexte visuel fortement dégradé, demandant aux sujets d'identifier des caractères isolés rendus sous la forme de glyphes de petite taille (19 pixels de hauteur) avec un contraste d'affichage à la limite de perception (test d'ajustement de la valeur du contraste) et des temps d'affichage très courts des caractères (17 et 34 ms). Les conditions courantes d'usage ne sont bien sûr pas celles-ci. Ces conditions extrêmes de test répondent à notre cahier des charges et aux exigences de performance et de robustesse visuelle en contexte dégradé. Elles permettent également de mieux mesurer les différences entre designs.

■ Résultats pour chaque fonte / distance

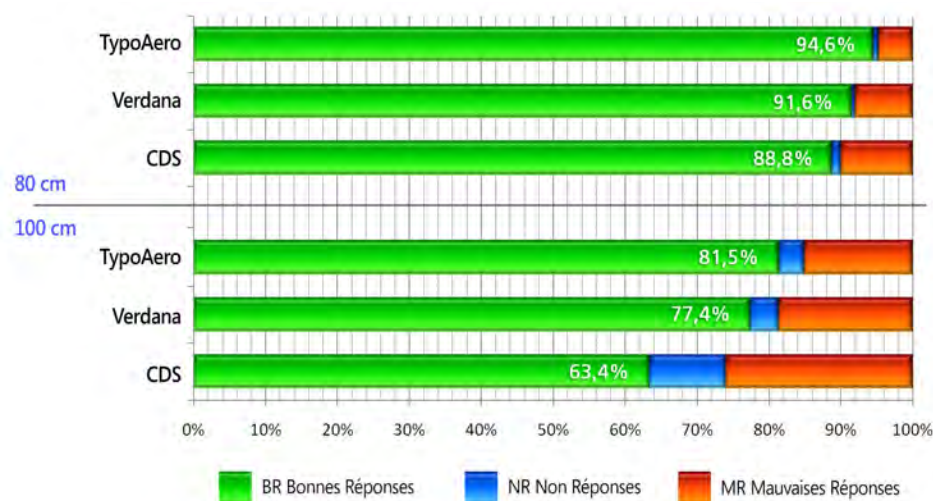


Figure 61 : Répartition des réponses par distance et par fonte pour les 12 sujets.

Les résultats indiquent globalement des différences entre les 3 fontes et entre les 2 distances œil-écran. La Figure 61 présente la répartition des réponses (BR, MR et NR) en fonction de la fonte (prototype TypoAero, Verdana et CDS) et de la distance œil-écran (D1 = 80 cm et D2 = 100 cm) pour l'ensemble des sujets. Pour chacune des distances, le nombre de bonnes réponses est le plus élevé pour la fonte prototype TypoAero, avec des résultats toujours légèrement meilleurs que ceux de la fonte Verdana et nettement meilleurs que ceux de la fonte CDS.

■ Analyse de variance

Pour chaque type de réponses (NR, BR et MR), une analyse de variance à mesures répétées (*within design ANOVA*) a été réalisée. Les analyses de variance ont montré des effets significatifs de la distance : la plus grande distance (d2) a entraîné une augmentation du nombre de non-réponses (NR) ($F(1,11) = 27,16$, $p = 0,000$), une augmentation du nombre de mauvaises réponses (MR) ($F(1,11) = 62,14$, $p = 0,000$) et une diminution du nombre de réponses

correctes (BR) ($F(1,11) = 125.37$, $p = 0,000$). Les analyses de variance ont montré également un effet de la police : Verdana et la police prototype présentent toutes deux moins de non-réponses (NR) que la police aéronautique ($F(2,22) = 35,52$, $p = 0,000$) ; la police prototype présente plus de réponses correctes ($F(2,22) = 104.79$, $p = 0,000$) et moins de réponses fausses ($F(2,22) = 25,39$, $p = 0,000$) que la police Verdana, qui elle-même présente des résultats nettement meilleurs que la police aéronautique. Des interactions significatives montrent que l'effet de la distance est plus grand pour la police aéronautique, avec une diminution du nombre de réponses correctes ($F(2,22) = 4,3$, $p = 0,042$) et une augmentation du nombre de non-réponses ($F(2,22) = 24,44$, $p = 0,000$). Pour les polices prototype et Verdana, l'effet de la distance est plus grand sur le nombre de mauvaises réponses ($F(2,22) = 4,24$, $p = 0,028$).

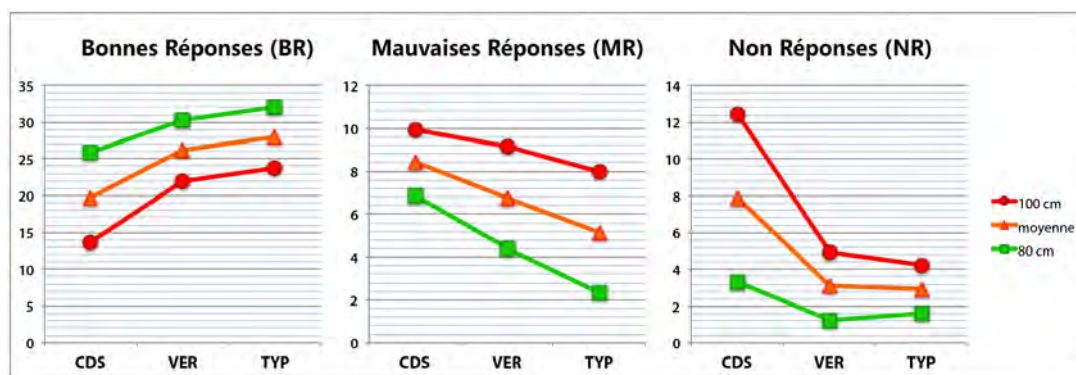


Figure 62 : Nombre de bonnes réponses (à gauche), mauvaises réponses (au centre) et non-réponses pour les fontes CDS, Verdana (VER) et TypoAero (TYP).

■ Conclusions

En résumé des ANOVAs, les analyses des différentes réponses possibles BR, MR ou NR (voir Figure 62) montrent de manière consistante que le prototype de fonte TypoAero en cours de réalisation, obtient de meilleurs résultats que les deux autres fontes. L'ampleur de la différence est plus faible avec Verdana qu'avec CDS. Cette dernière fonte se montre également beaucoup plus sensible à l'effet de la distance qui entraîne davantage de non-réponses que de mauvaises réponses : contrairement aux deux autres fontes pour lesquelles l'augmentation de la distance œil-écran augmente le nombre d'erreurs, la fonte CDS devient imperceptible. Dans ce contexte visuel défavorable, brièveté du temps d'affichage et faible contraste, la fonte prototype présente une grande robustesse visuelle et permet de bien identifier les caractères alphanumériques présentés.

2.3.3.2. Matrices de confusion : mesurer la discontinuité

Afin de mieux comprendre l'impact du design des caractères, et du rendu pixel des formes, pour la reconnaissance des lettres, nous avons généré des matrices de confusion des lettres [Bouma 71].

2.3.3.2.1. Réalisation des matrices de confusion

Ces matrices présentent, pour chacune des fontes/distances, les correspondances entre le stimulus affiché et la réponse donnée. C'est une mesure indirecte, mais significative de la similarité des formes. La Figure 63 présente

les matrices des fontes CDS et TypoAero pour la distance D2. Les résultats compilent les réponses pour les 12 sujets et pour les différents essais de chaque caractère affiché pour une fonte/distance donnée. En ligne, les 36 stimuli affichés, en colonne les caractères nommés par le sujet. Les bonnes réponses s'affichent sur la diagonale de la matrice (croisement « A » affiché et « A » nommé, « B » affiché et « B » nommé...). Toutes les autres cases correspondent à de mauvaises réponses, par exemple « 5 » affiché et « S » nommé. La couleur des cases correspond à un dégradé de valeurs continues, du jaune-orangé clair au rouge foncé, de 1 à 24. Ces nombres représentant le nombre d'occurrences pour une case donnée. La colonne de gauche représente le nombre de non-réponses pour ce caractère, l'intensité du bleu indique l'importance de cette valeur.

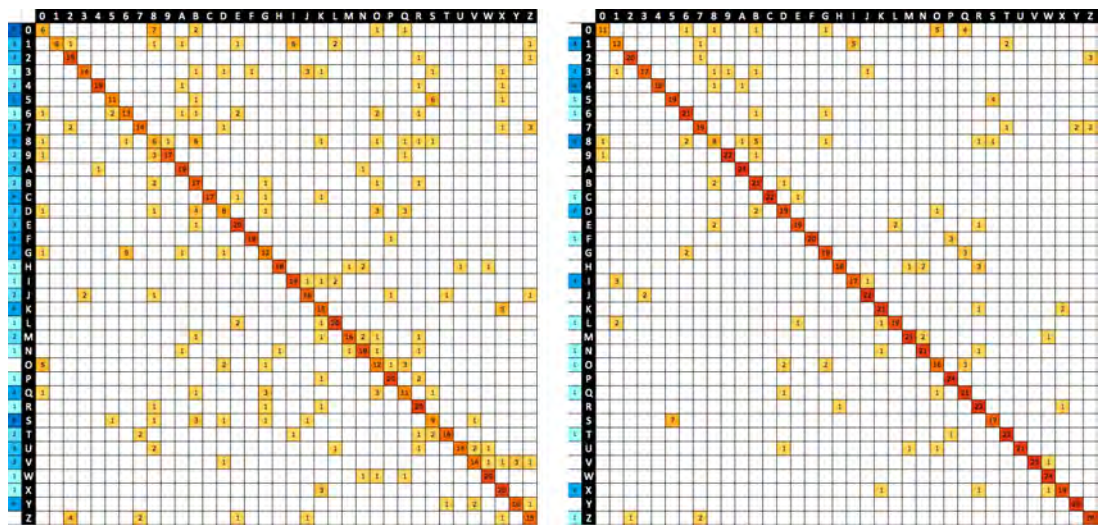


Figure 63 : Matrices de confusion pour les fontes CDS (à gauche), et TypoAero (à droite), des réponses compilées (12 sujets × 2 essais) pour une distance de 100 cm.

2.3.3.2.2. Analyse des distributions et métriques de confusion

Pour une distance de 100 cm (d2), la fonte CDS (Figure 63 à gauche), présente une distribution des confusions entre caractères beaucoup plus étalée que celle obtenue pour la distance 1 de 80 cm. De nombreuses confusions sont faites une seule fois, les non-réponses sont nombreuses et les valeurs des cases situées sur la diagonale (bonnes réponses) sont faibles (de 2 à 14). Ces résultats correspondent à la très grande difficulté à discriminer les glyphes de cette police à cette distance et avec ces conditions dégradées de lecture.

Les matrices de confusion des fontes Verdana et TypoAero présentent des distributions plus resserrées et caractérisant mieux les confusions connues entre caractères. Pour la fonte TypoAero (Figure 63 à droite) les confusions majeures sont : I pour 1 (9 occurrences), S pour 5 (6), Z pour 7 (6), ou Z pour 2 (4), N pour H (5). Pour la Verdana : O (8) et Q (5) pour 0, 1 et I (8), Z pour 2 (7), S pour 5 (9) et 5 pour S (4), N pour H (7), Q pour O (4) ou R pour P (4).

■ Différence graphique entre glyphes

Ces résultats mesurent pour chaque glyphe le niveau d'identification visuelle du caractère et les confusions visuelles avec les autres caractères (lettres et chiffres). Nous avons comparé ces résultats, notamment ceux qui caractérisaient des problèmes importants de confusion entre paires de caractères, avec

la différence graphique entre images des glyphes. Pour chacune des paires à tester, nous avons réalisé une différence d'image, exprimée en niveau de gris, entre les glyphes de chacune des fontes. Pour chaque pixel de l'image résultante, la valeur comprise entre 00 (noir) et FF (blanc) correspondait à l'écart entre valeurs de gris de ce pixel dans les deux images comparées.



Figure 64 : Différences entre images des glyphes 1/I et 5/S des fontes TYP et VER

La Figure 64 montre la différence d'image entre les paires de caractères « I », « 1 » et « S », « 5 » pour les glyphes des fontes TypoAero (à gauche) et Verdana (à droite). Ces deux images résultantes présentent une faible caractérisation de la différence visuelle des glyphes, par exemple la répartition très homogène des pixels de différences entre les 2 couples « S » et « 5 », avec un dessin trop favorable au « 5 » pour TypoAero et au « S » pour la Verdana.

2.3.3.2.3. Augmenter la discontinuité : enseignements pour itérer le design

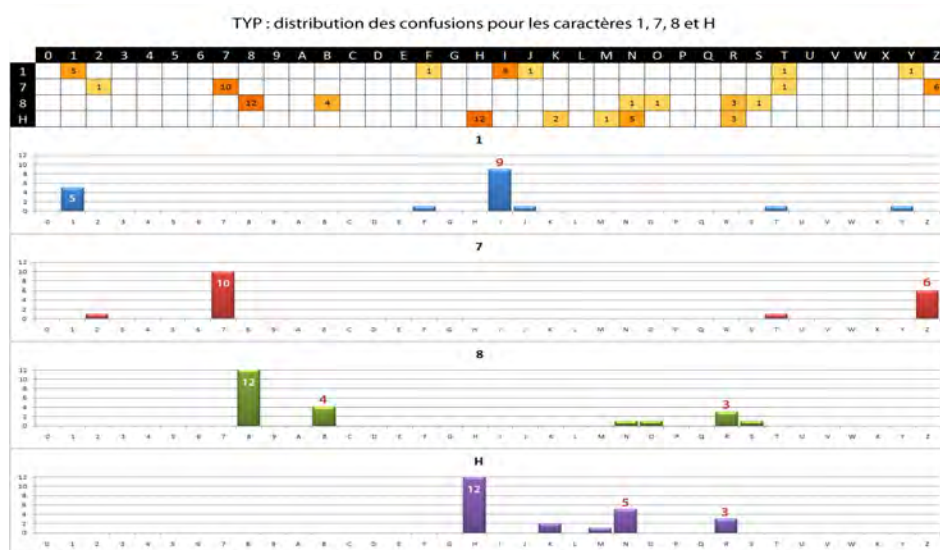


Figure 65 : Distribution des confusions pour les glyphes 1, 7, 8 et H de la fonte prototype TypoAero, résultats de l'expérimentation 1.

Nous pouvons utiliser ces résultats pour réaliser une première itération de design pour le prototype de la fonte TypoAero. La Figure 65 montre un extrait de la distribution, pour les 12 sujets de l'expérience 1, des confusions entre caractères pour la fonte TypoAero. On voit nettement pour le caractère « 1 » par exemple qu'il a plus souvent été reconnu comme « I » (9 fois) que comme « 1 » (5 fois). Le design de la demie diagonale gauche est donc insuffisamment perçu et nécessite au moins un allongement, voire une augmentation de caractérisation de la pointe supérieure. Le « 7 » est encore largement confondu avec le « Z » (6 fois), et est seulement différencié par l'absence visuelle de la traverse basse. Ce caractère devra être modifié de façon importante, par exemple en incurvant la diagonale vers une verticale médiane. Les caractères 8 et H présentent des confusions plus distribuées, leur score (reconnaissance) est moyen. Le design de ces caractères devra être légèrement retouché.

2.3.3.3. Expérimentation 2 : espace continu de paramétrage des propriétés

L'objectif de ce deuxième type d'expérimentation était d'identifier les « bonnes » valeurs de paramétrage des invariants typographiques de notre fonte prototype. Le but est d'aider le design en mesurant l'impact de variations assez faibles (tuning) d'une propriété autour d'une valeur de référence. Ces métriques nous permettant, soit de sélectionner la valeur présentant un avantage notable, soit d'identifier une plage de valeurs possibles avec une mesure «continue» de son impact sur la lisibilité.

2.3.3.3.1. Protocole expérimental

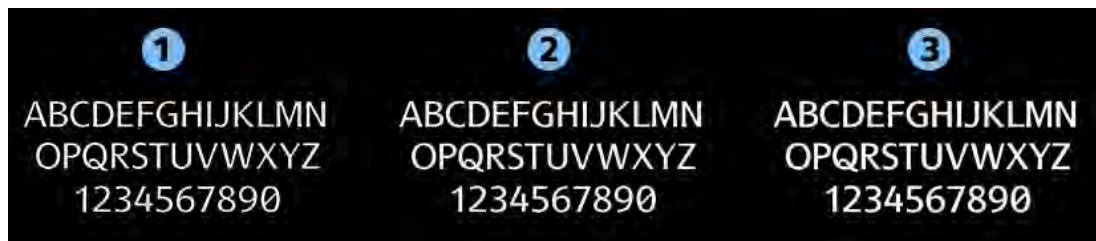


Figure 66 : Les 3 jeux de caractères testés avec 3 différentes valeurs de gris

L'expérimentation présentée ici concerne la propriété de gris. Nous avons comparé trois versions de la police prototype TypoAero pour trois valeurs de gris (cf. Figure 66). 12 sujets, âgés de 21 à 57 ans, ont réalisé une tâche de recherche visuelle de caractères (lettres et chiffres) permettant une analyse quantitative (temps, erreur). À la fin de la session, un test de comparaison subjective a été réalisé avec la méthode de comparaison par paires (pairwise comparison) permettant une analyse qualitative des préférences du sujet.

■ Tâche expérimentale

Les sujets devaient tout d'abord rechercher un caractère cible donné parmi un ensemble de caractères distracteurs affichés sous la forme d'un tableau de 10×10 caractères (cf. Figure 67), sur un écran LCD (LCD 30» Apple Cinema Display HD), à une distance de 80 cm (distance au PFD), et pour 3 couleurs de fond utilisées dans les interfaces cockpit. Une fois la recherche terminée, le sujet devait donner le nombre d'occurrences trouvées du caractère dans la grille. Le test n'avait pas de limite de temps de recherche, celle-ci s'achevait avec un appui sur la barre Espace par le sujet en même temps que l'énoncé de la réponse.

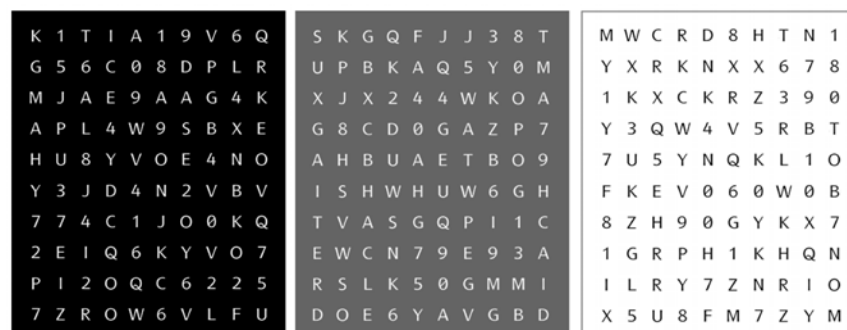


Figure 67 : Grille de recherche de 10×10 caractères, affichée dans les 3 polarités, sur 3 couleurs de fond, noir, blanc et gris.

Pour chaque essai, le nombre pseudo-aléatoire d'occurrences était compris entre 1 et 5. Pour la grille, il y avait 36 caractères distracteurs possibles (numéros 0 à 9; lettres de A à Z) et 18 caractères cibles, les nombres et les lettres majuscules (0, 1, 2, 4, 6, A, B, E, G, H, I, K, M, N, O, R, S, Z), choisis pour leur tendance à devenir moins lisible avec une augmentation de la graisse (par exemple, E ou A), ou leur capacité à être confondu avec d'autres caractères (par exemple, 1 et I, ou O et 0). Une table précalculée était utilisée, avec 1, 2, 3, 4 ou 5 occurrences d'un caractère cible donné et le nombre correspondant de distracteurs (99 à 95).

■ Variables indépendantes

4 variables indépendantes étaient définies : 3 polarités d'affichage = fond d'écran blanc, noir ou gris (voir Figure 67), 2 valeurs de contraste = normal ou faible, 3 graisses (voir Figure 66), et 3 répétitions (essais) par test. L'ordre de passage des tests et des valeurs de polarité, contraste et graisse était contre-balancé entre sujets. Les 3 répétitions de chaque condition expérimentale étaient groupées.

■ Variables dépendantes

2 variables dépendantes étaient mesurées : le temps de réponse du sujet et la différence entre le nombre réel d'occurrences du caractère dans la grille et celui reporté par le sujet.

2.3.3.3.2. Résultats expérimentaux

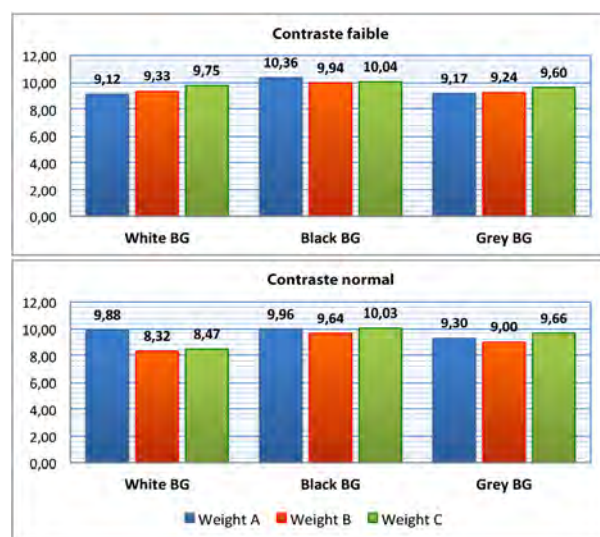


Figure 68 : Moyenne du temps de réponse pour chaque graisse (A, B, C), pour les 3 polarités d'affichage (fond blanc, noir, gris), (en haut) avec un contraste faible, (en bas) avec un contraste normal.

Les résultats sont présentés par la Figure 68. L'analyse de la variance sur le temps de réponse ne montre que 2 effets principaux significatifs et aucun effet d'interaction significatif. Il y a un effet de la polarité ($F(2,22) = 3,778$, $p = 0,038$). Une comparaison par paires post-hoc a montré que le temps de réponse est plus long pour le fond noir que pour le fond blanc. Le fond gris n'étant pas significativement différent de, soit le blanc ou le noir. L'effet significatif du contraste ($F(1,11) = 4,968$, $p = 0,047$) montre que le temps de réponse est plus long lorsque le contraste est plus faible. L'absence d'autres

résultats significatifs est sans doute due au fait que les différences de valeur des graisses comparées ont été délibérément choisies assez faibles. En effet, des différences plus importantes pourraient donner des effets significatifs, mais ne présentent pas d'intérêt dans le contexte de notre étude. Le but de ce type d'expérience étant d'aider le designer à choisir la ou les valeur(s) correcte(s) d'une propriété, non pas de prouver l'effet d'un facteur donné.

■ Comparaison par paires



Figure 69 : Comparaison par paires de 2 pseudo-mots pour 2 valeurs de graisse.

À la fin de chaque session de tests pour une polarité donnée (blanc, noir, gris), nous avons affiché successivement sur l'écran 18 paires de pseudo-mots ou chiffres (cf. Figure 69), sur le même fond, mais en utilisant deux graisses différentes pour chacun des côtés gauche et droit de l'écran. Pour chaque paire, les sujets devaient indiquer quelle version (quel côté) semblait plus agréable et confortable de lire [Thurstone]. Les résultats montrent que les graisses « forte » et « moyenne » ont été préférées pour un affichage sur les fonds noir et gris alors que les graisses « moyenne » et « faible » ont été préférées sur le fond blanc. En d'autres termes, que pour le choix d'une seule valeur de graisse, la valeur centrale était le meilleur compromis pour permettre une lecture confortable, quelle que soit la polarité.

2.3.3.4. Identifier des valeurs continues de paramétrage



Figure 70 : Expérimentation 2, une plage de valeurs possibles pour la graisse, (à droite) détail de l'écart possible pour le design des fûts.

Les résultats obtenus avec cette expérimentation montrent principalement des impacts connus, par exemple de l'effet du contraste sur le temps de lecture, l'effet de la polarité et celui du couplage entre polarité et graisse. Ils ne permettent pas d'identifier une valeur de graisse plus favorable pour l'ensemble des contextes d'affichage visés. Autrement dit, ces variations de valeur pour la propriété de graisse (valeurs assez resserrées) peuvent être utilisables comme un empan de valeurs (range) possibles de paramétrage.

La Figure 72 montre cet écart de valeur, pour l'invariant de graisse, entre la fonte de graisse « A » (plus fine) et la fonte de graisse « B » (plus grasse), par une superposition de glyphes. La partie droite de la figure présente un détail de l'écart entre les deux variantes. Les résultats non significatifs de ce type d'expérimentation, comparant des variations visuellement assez proches, mais pourtant très significatives en termes de design, permettent de considérer l'ensemble (ou une partie selon les résultats) de ces valeurs comme pertinentes. Ils ont permis, et permettront si besoin pour de futures évolutions, de régler la valeur de paramétrage de cette propriété à l'intérieur

de cet écart de valeur. Ce choix de paramétrage peut alors être fait en fonction d'autres exigences du design, par exemple en fonction d'autres valeurs de paramétrage comme celui de la propriété de chasse (largeur du caractère en relation à sa hauteur) pour répondre au besoin de densité du texte (nombre de caractères potentiellement affichables sur une « ligne » écran) ou la robustesse visuelle à l'angle de vision (déformation du caractère sur les écrans latéraux).

2.3.3.5. Expérimentation 3 : évaluer la continuité et le confort de lecture

Le but de ce troisième type d'expérimentation était de valider le design de la fonte prototype avec des équipages pilotes, dans un cadre pseudo-opérationnel des activités avion et des interfaces du cockpit, de tester la lisibilité et le confort de lecture de cette fonte, et d'évaluer qualitativement son acceptation par les pilotes commerciaux.

L'objectif plus précis de l'expérimentation reportée a été tout d'abord d'informer le design sur l'adéquation de la fonte aux affichages textuels réels et actuels du cockpit. Une sorte de preuve de concept et de conformité de la fonte aux besoins opérationnels d'affichage des informations. Un deuxième objectif était de vérifier la capacité de la fonte à supporter efficacement, au moins aussi bien que la fonte actuelle, les procédures entre pilotes basées sur la lecture des informations des différents écrans et systèmes. Un troisième objectif était de mesurer par des méthodes de type comparaison par paires la performance de lecture de ces nouveaux affichages en contexte lumineux dégradé (contexte nuit et contexte solarisation) en la comparant aux affichages actuels. Un dernier objectif était de recueillir, au travers d'interviews, des éléments qualitatifs concernant l'acceptation par les pilotes de cette nouvelle fonte.

2.3.3.5.1. Méthodologie et protocoles

Nous avons tout d'abord sélectionné, avec des responsables facteurs humains du cockpit, un ensemble d'affichages réels, avec 24 copies d'écran issues des différentes interfaces du cockpit, correspondant à des situations opérationnelles. Six situations ont été définies portant sur l'affichage des 6 écrans du simulateur A350 : l'écran EFIS PFD (Primary Flight Display) + ND (Navigation Display) de chacun des pilotes, l'écran OIS-OIT (Onboard Information et Onboard Maintenance Systems) de chacun des pilotes et les 2 écrans centraux partagés ECAM (supervision avion et communication) et MFD (Multi Functional Display).

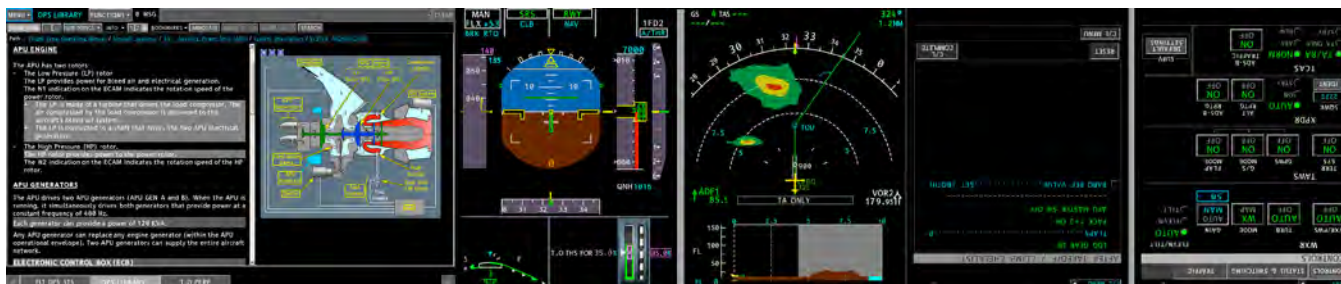


Figure 71 : Exemple d'affichage multi écrans d'une situation opérationnelle pour la moitié gauche du cockpit

Ces situations ont été composées sous la forme d'affichage global (multi écrans) et transposées pour la nouvelle fonte avec un remplacement à l'identique

dans les 24 pages exemples de toutes les informations textuelles : taille, couleur et position similaires de chaque caractère (cf. Figure 71). Ces situations graphiques étaient couplées à une demande d'actions (séquences) à effectuer par les pilotes et centrées sur la lecture de certaines informations.

La session de test était découpée en deux parties de 3 situations, correspondant à 2 contextes lumineux : un contexte de vol de nuit avec un cockpit quasiment plongé dans le noir avec le seul éclairage des écrans ; un contexte jour, aux conditions lumineuses dégradées par un soleil rasant (simulé par des spots lumineux placés à l'extérieur du cockpit) venant du côté arrière gauche (hublots latéraux). L'ordre de passage des situations et du contexte lumineux était contrebalancé entre sujets. Chaque situation était répétée deux fois : la première fois, le pilote exécutait la procédure demandée, la deuxième fois, la situation était rejouée pour permettre au pilote de verbaliser une évaluation de l'adéquation des nouvelles fonte à la situation. Une première question portait sur la conformité des pages à l'expérientiel du pilote. Un entretien semi dirigé permettait ensuite de recueillir son évaluation des apports ou des différences produites par les nouvelles fontes en termes de lisibilité des informations et de l'interface.

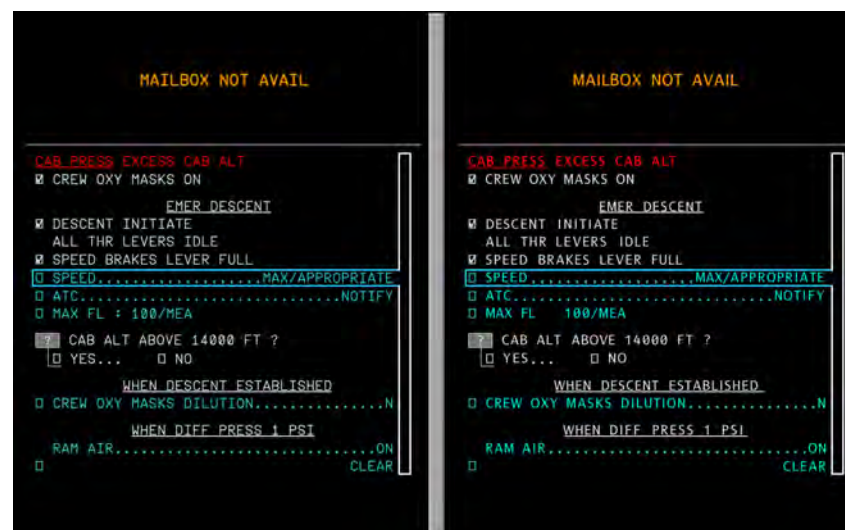


Figure 72 : Exemple de pages utilisées pour le pairwise et comparant côte à côte une interface avec les 2 fontes CDS (à gauche) et TypoAero (à droite).

À la fin de chaque demi-session, une séance de comparaison par paires permettait de comparer l'affichage des interfaces avec les deux fontes - fonte actuelle CDS et fonte prototype (cf. Figure 72), pour chacune des conditions lumineuses. Le pilote devait indiquer sa préférence pour l'une des pages (côté gauche ou droit) en termes de « confort » de lecture et défini comme « à la fois facile à lire, pas fatigante et harmonieuse ».

Une fois le test de comparaison par paires terminé, le sujet devait émettre un jugement sur la nouvelle police. Il devait remplir une feuille comportant 5 questions auxquelles il fallait répondre par un chiffre allant de 1 (très mauvais) à 5 (excellent). Les questions portaient sur la lisibilité, la sécurité, le confort de lecture, l'harmonie et l'adaptation à l'image du cockpit. Pour chaque question, le sujet avait la possibilité d'ajouter un commentaire. Afin d'avoir des exemples concrets de texte, le sujet avait à disposition 5 pages parmi celles utilisées pour le test de comparaison par paire. Ces pages, choisies pour la diversité de leur configuration et système dans le cockpit, étaient affichées sur l'écran utilisé pendant l'expérience et le sujet pouvait basculer d'une page à l'autre à volonté.

2.3.3.5.2. Résultats des tests de comparaison par paires

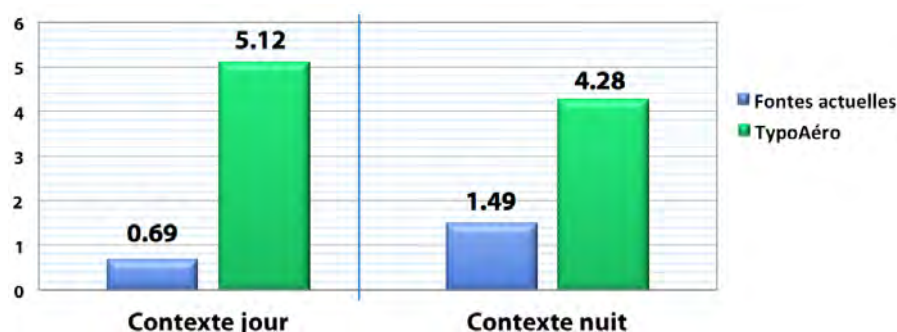


Figure 73 : Moyenne des préférences (tous sujets, tous écrans)

Les résultats des tests de comparaison par paires, réalisés à la fin de chaque partie et pour les deux conditions lumineuses montrent que les écrans réalisés avec la fonte TypoAéro ont toujours été préférés aux écrans actuels et à la fonte CDS. La Figure 73 montre la moyenne des résultats compilés des pages choisies pour chacune des deux fontes et pour les deux contextes jour et nuit. Pour la condition jour, la fonte TypoAéro est globalement préférée pour 85% des réponses. Pour la condition nuit, la fonte TypoAéro est préférée pour 71% des réponses.

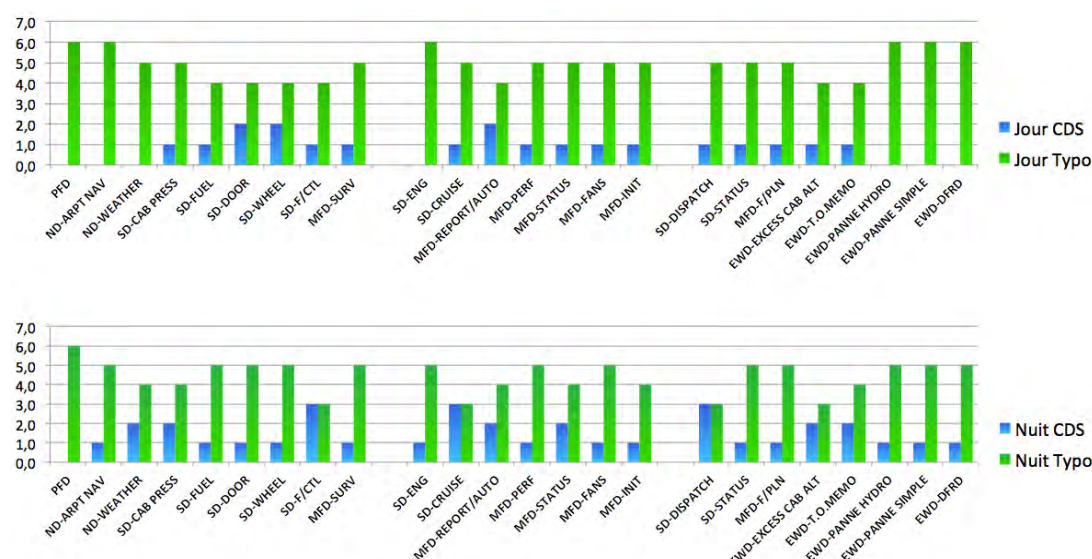


Figure 74 : Moyenne (tous sujets) des préférences entre fontes par écran et pour les 2 contextes lumineux : (en haut) jour et (en bas) nuit.

La Figure 74 montre les résultats détaillés pour chacune des 24 pages présentées et pour les deux contextes lumineux. La fonte TypoAéro est préférée pour 22 pages et à égalité pour 2 pages : SD-F/CTL et SD-DISPATCH. Ces résultats, en faveur de la nouvelle fonte, sont néanmoins contraints par l'obligation de composition à l'identique des pages. Le respect des tailles, emplacements et couleurs du texte, outre qu'il ne permet pas d'exprimer les qualités de composition de la nouvelle fonte, notamment la régularité visuelle des espaces, engendre deux problèmes visuels. Tout d'abord une sur-luminosité des textes composés avec la fonte TypoAéro sur le modèle des écrans actuels. Un pilote dont l'acuité visuelle était exceptionnelle (+ de 15) indiquait une «*sensation de brûlure visuelle*» pour la condition nuit et avec certaines couleurs de texte. Des problèmes de composition liés à la conception à l'identique des pages actuelles, la taille des textes et surtout la gêne provoquée par les filets

d'encadrement touchant les bords des caractères. Enfin, l'utilisation du zéro barré pour des champs connus par les pilotes comme numériques a été jugée moins pertinente que l'usage actuel spécialisant l'utilisation du zéro barré.

2.3.3.5.3. Résultats qualitatifs des interviews et questionnaire

Ces résultats qualitatifs sont issus des entretiens menés avec les pilotes pendant la seconde itération de chacune des six situations et qui visaient à recueillir le jugement des pilotes sur la nouvelle fonte. Nous présentons ici une synthèse de ces appréciations :

■ synthèse des interviews

Pour l'ensemble des sujets, pilotes commerciaux, les pages présentées avec la fonte actuelle CDS sont jugées conformes aux affichages des cockpits qu'ils utilisent en situation opérationnelle. Cette vérification préalable est essentielle pour valider les résultats de la comparaison par paires et recueillir leurs avis sur les bénéfices potentiels de l'usage des nouvelles fontes.

Par rapport à CDS, la nouvelle fonte Typoero est jugée :

- ✓ *aussi, ou plus, lisible*
- ✓ *plus nette (caractères moins empâtés)*
- ✓ *plus homogène (couleurs, densité, luminosité)*
- ✓ *plus lumineuse*
- ✓ *plus confortable et esthétique*
- ✗ *le design du zéro barré est généralement rejeté pour son utilisation dans des champs d'information « connus comme affichant une valeur numérique »*
- ✓ *Pas de problème rapporté concernant la lecture sur les différents écrans (distance, orientation)*
- ✓ *La nouvelle fonte est jugée acceptable pour les interfaces cockpit et pour l'activité des pilotes*
- ✓ *Elle apparaît résistante aux conditions de lecture dégradée et préférable à la fonte CDS pour les deux conditions, jour avec soleil rasant et nuit*

■ Synthèse des réponses au questionnaire

Les réponses des sujets au questionnaire ont été rapportées dans des tableaux comme le nombre de fois qu'ils ont coché les cases correspondantes aux notes respectives 1, 2, 3, 4 ou 5. Sous chaque tableau, les commentaires écrits des sujets ont été retranscrits. En résumé, les sujets ont attribué 48 fois la note 5 (excellent), 46 fois la note 4 (bon), 5 fois la note 3 (moyen) et une fois la note 2 (mauvais). La lisibilité, la sécurité et l'adaptation à l'image du cockpit ont été majoritairement jugées excellentes tandis que le confort de lecture et l'harmonie ont été plus souvent jugés bons. Pour le confort de lecture et pour l'harmonie, c'est souvent l'emploi du gras qui semble poser un problème, notamment à cause du fort contraste quand on respecte les couleurs des pages actuelles. L'emploi du gras devra donc être soigneusement calibré (taille et contraste lumineux) en prenant en compte que les caractères de la nouvelle fonte s'affichent avec davantage de pixels que ceux de la fonte CDS.

2.4. De TypoAero à AI-B612 : production d'un composant logiciel pour l'industrie aéronautique

Le travail de recherche et d'expérimentation mené avec des versions évolutives de la fonte prototype TypoAero a abouti à la finalisation et à la livraison d'une police de caractères baptisée « AI-B612 » par Airbus et comprenant huit fontes TrueType.

2.4.1. Développement et validation

Après deux années d'une première période du projet orientée recherche, et intégrant les phases d'analyse du besoin, de conception et de vérification expérimentale, un deuxième temps du projet s'est focalisé sur le développement « produit ». Son but était le développement des différentes variantes de fontes logicielles, intégrant l'ensemble des caractères requis pour l'activité, la validation de cette police numérique et la livraison du produit.

Ce travail a été réalisé avec l'aide de la société Intactile Design² et plus spécialement pour le design typographique par Nicolas Chauveau et Thomas Paillot. Nous avons tout d'abord travaillé pour transmettre les connaissances acquises et permettre la prise en main typographique de la fonte prototype. Nous avons ensuite itéré ensemble la conception typographique d'une fonte de référence (Regular), puis Intactile Design s'est chargé du développement des variantes de fontes et de la complétion du jeu de caractères.

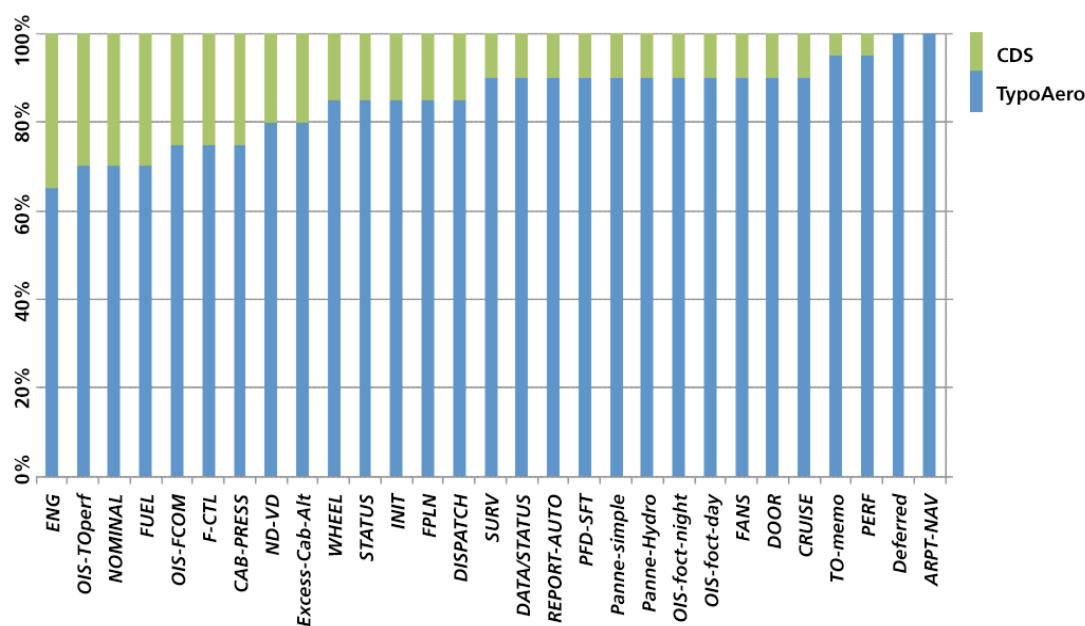


Figure 75 : Moyenne des préférences (tous sujets) entre fontes pour chacun des écrans

Pendant cette seconde phase, les expérimentations ont été poursuivies avec Sylvie Athènes pour réitérer les expérimentations de vérification de la lisibilité-discrimination (cf. 2.3.3.1), puis pour valider la nouvelle police dans un contexte opérationnel (cf. 2.3.3.5). La Figure 75 montre les résultats de la comparaison par paire réalisée en fin de projet et comparant les fontes actuelles CDS et les fontes TypoAero.

² Intactile Design est une entreprise de design IHM située à Montpellier : <http://intactile.com/>

2.4.2. Livraison : une famille de 8 fontes numériques

La police a été livrée à Airbus sous la forme d'une famille de huit fontes numériques au format TrueType³ demandé. Cette police intègre les variantes AIB612-Regular, AIB612-Italic, AIB612-Bold et AIB612-BoldItalic (Figure 76), ainsi que quatre mêmes variantes pour un espacement monospace : AIB612 Mono-Regular, AIB612 Mono-Italic, AIB612 Mono-Bold et AIB612 Mono-BoldItalic (Figure 77). Les fontes intègrent un jeu de caractères étendu.

2.4.2.1. Fontes AI-B612 à espacement proportionnel



Figure 76 : Les 4 variantes de fontes AI-B612 à espacement proportionnel, Regular, Italic, Bold et BoldItalic

2.4.2.2. Fontes AI-B612 monospace



Figure 77 : Les 4 variantes de fontes AI-B612 à espacement monospace, Mono Regular, Mono Italic, Mono Bold et Mono BoldItalic

3 TrueType est un format de fonte numérique créé par Apple et intégré en 1991 aux OS Mac (system 7) puis Microsoft (Windows 3.1). Sa particularité est de définir les caractères par des courbes de Bézier quadratiques et d'intégrer des algorithmes d'optimisation sophistiqués de rastérisation (instructions de Hinting).

2.4.2.3. Jeux de caractères

Sur la demande d'Airbus, un jeu de caractères étendu de 587 signes typographiques a été créé et adapté pour chacune des variantes de fontes. Ce *charset* (voir extraits Figure 78) inclut 63 signes pour les lettres latines capitales et minuscules et les chiffres, 64 signes de ponctuation et symboles, 78 signes pour les lettres accentuées et les ligatures, 76 signes pour l'alphabet grec et les chiffres romains, 34 signes pour les indices et exposants, 113 signes mathématiques ou de mesure, 62 signes pour les flèches et 97 signes pictographiques. Ces pictogrammes couvrent un ensemble de fonctions liées à l'activité du cockpit (systèmes avion et système d'information), par exemple des jeux de symboles spécifiques pour les télécommunications, la météo, la navigation ou l'informatique (Figure 78, colonne de droite).

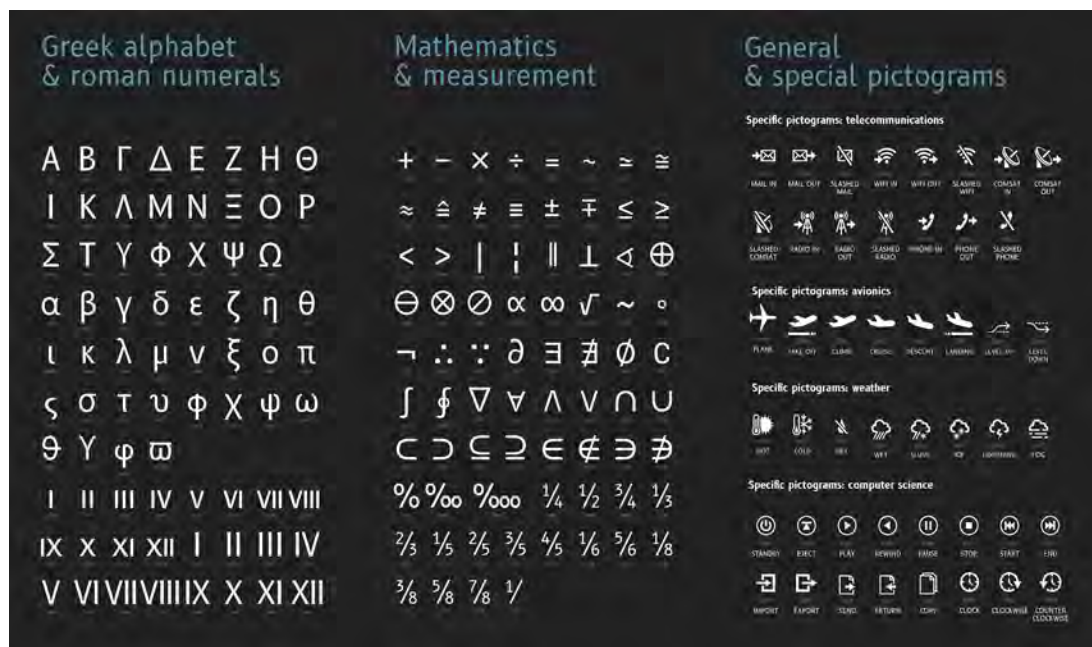


Figure 78 : Extraits du jeu de caractères étendu de la police AI-B612

2.5. Conclusion et perspectives

2.5.1. Travail réalisé

2.5.1.1. Objectifs industriels et valorisation

Les finalités de cette coopération de recherche DSNA - Airbus et les objectifs industriels plus précis du projet ont été atteints. Les livrables ont été réalisés, notamment ceux concernant les composants logiciels des fontes numériques, avec la livraison de huit fontes numériques spécialement conçues pour les interfaces du cockpit, intégrant un jeu étendu de 587 caractères. Ces fontes ont été déployées par Airbus sur des environnements de simulation de recherche qui permettront la conception de nouvelles interfaces cockpit mettant en œuvre cette police aéronautique. Des processus d'évaluation complémentaires seront alors à conduire par Airbus, à partir de ces mises en œuvre, pour la validation en contexte opérationnel.

Pour la première fois, à notre connaissance, un tel processus de recherche a été conduit dans l'industrie aéronautique pour analyser et instrumenter les besoins de la représentation graphique des informations textuelles sur les interfaces du cockpit. Ont été identifiés les exigences très spécifiques et les principes de design devant guider la conception et l'usage de typographies numériques pour le cockpit. A été rassemblé un ensemble d'apports théoriques et techniques concernant le processus de lecture, le problème de la lisibilité et les moyens typographiques. A été analysé l'existant technique de l'affichage des informations textuelles dans le cockpit. Ont été conçues et développées des techniques pour augmenter la lisibilité des informations affichées sur écran en vision périphérique et en contexte d'usage dégradé. A été conduit un processus de conception centré sur l'expérimentation, avec des tests menés en laboratoire et dans le cockpit qui ont permis de valider les concepts et les hypothèses, de mesurer la lisibilité en contexte dégradé et d'évaluer la validité opérationnelle des fontes.

2.5.1.2. Résultats de recherche

2.5.1.2.1. Conception typographique pour l'IHM

Concernant les résultats de recherche directement liés au projet trois points concernent particulièrement l'interaction homme-machine :

Tout d'abord, la problématique de la lisibilité des informations textuelles de l'interface graphique en contexte d'usage critique et dégradé. Nous avons profité du contexte d'activité très spécifique du cockpit pour étudier et mesurer l'impact des formes typographiques numériques sur le mécanisme de la lecture. Plus précisément, nous avons renseigné la performance de lecture et l'utilisabilité des typographies numériques pour des contextes critiques : performance des formes typographiques en vision périphérique pour permettre une bonne anticipation de la lecture sur écran et une baisse de la demande attentionnelle ; robustesse des formes typographiques pour supporter les contextes d'usage dégradés dans l'IHM et favoriser la discrimination et l'identification visuelle des caractères sur la base des composantes basse fréquence ; efficacité et confort de la lecture des fontes, basés sur une mise en œuvre fine des invariants typographiques et des métriques des fontes numériques.

Nous avons dans ce sens montré l'intérêt des *matrices de confusion* pour mesurer l'impact des choix de forme et aider le design. Ces matrices de confusion, dont les données sont issues de tests expérimentaux, permettent de comparer des solutions (entre fontes), de mesurer les distances perceptuelles entre formes (entre caractères), et de renseigner l'aspect directionnel d'un défaut de discrimination. Elles constituent ainsi un outil d'analyse formelle et d'évaluation du design essentiel pour le concepteur.

Enfin nous avons montré l'adéquation d'un processus itératif de conception centré expérimentation pour le design de composants graphiques de l'interface tels que les typographies numériques. Ce processus expérimental intégré permet de valider les concepts de design, d'identifier les valeurs de propriété et de mesurer qualitativement l'expérience utilisateur.

2.5.1.2.2. Apports du concept de continuité

Le concept de continuité a constitué un outil central pour ce travail de recherche. Les notions de discontinuité et de continuité ont permis de penser et d'instrumenter les deux besoins de la lecture des informations textuelles ou les deux exigences de la lisibilité : la *lisibilité-identification* (legibility) et la lisibilité-compréhension (readability). La *lisibilité-identification* de chaque caractère est garantie par la création de *discontinuités perceptives*, de *ruptures* et de *contrastes* entre caractères et son design fait appel aux dimensions 1, 2 et 4 du concept de Continuité (cf. **Acp.1,2,4**). La lisibilité-compréhension (readability) est réalisée par la création et l'organisation de régularités visuelles : structure en primitives du caractère, forme et régularité des tracés, des espacements, des alignements... qui permettent de créer une *continuité de lecture* de l'information et une *harmonie visuelle du texte*. Le design de cette lisibilité-compréhension fait appel aux dimensions 1, 3, 4 et 6 du concept de Continuité (cf. **Acp.1,3,4,6**).

Ces deux usages *consubstantiels* du concept de continuité présentent une pertinence pour penser et supporter plus globalement la lisibilité et l'utilisabilité des objets graphiques de l'interface. Sa formalisation intéresse la conception de la saillance visuelle, de la hiérarchie perceptuelle, de la composition spatiale et de la mise en relation de ces objets graphiques dans des structures visuelles favorisant la continuité de lecture et d'accès. Cette dimension de la continuité graphique des objets et formes, mais aussi de la composition visuelle entre composants est essentielle pour la conception des interfaces graphiques utilisateur, notamment pour répondre à la complexification des affichages et des usages.

Comme apports techniques, nous soulignons l'intérêt des matrices de confusion pour exprimer une notion de distance de la discontinuité entre formes et instrumenter le design. Concernant la continuité nous avons montré l'adéquation d'empans de valeurs continues de propriétés (ici les invariants typographiques) et de leur composition pour la conception de formes devant répondre à de multiples exigences.

2.5.1.3. Perspectives

Les principes de structuration des formes visuelles issus de cette recherche peuvent être étendus à d'autres objets graphiques de l'interface. Nous souhaitons ainsi prolonger ce travail sur les typographies numériques pour étudier

les apports potentiels du concept de continuité pour supporter de façon plus générique la conception des objets et composants graphiques « élémentaires » de l'interface. Notamment concernant : la formalisation d'objets graphiques créés par la composition de primitives de formes ; la notion de jeux de formes embarquant des propriétés « intrinsèques » de composition et de relations entre formes ; l'accessibilité à l'utilisateur aux propriétés « internes » des objets graphiques ; les valeurs continues de paramétrage ; l'organisation de la saillance perceptuelle, de l'harmonie graphique des formes et de la continuité d'accès perceptuel et de lecture des objets et composants graphiques.

Strip’TIC, un espace continu d’interaction
entre monde physique et espaces numériques.

TROISIÈME PARTIE

Strip'TIC : explorer la continuité des espaces interactifs entre mondes physique et numérique.



Figure 79 : *Strip'TIC*, un espace interactif tangible pour les contrôleurs aériens.

Après une première exploration « *par le bas* » des apports du concept de continuité pour la conception de systèmes de formes élémentaires pour l'interface graphique, cette partie présente une exploration « *par le haut* » du concept, dans l'espace global du dispositif interactif. Elle a été menée dans le cadre du projet *Strip'TIC* qui vise à la conception d'un espace interactif tangible pour les contrôleurs aériens (voir Figure 79). Ce projet de recherche commun du Laboratoire d'Informatique Interactive (LII) de l'ENAC et de la DSNA/DTI a constitué un terrain particulièrement intéressant qui nous a permis d'explorer les apports du concept de continuité pour la conception des espaces d'interaction entre mondes physique et numériques.

3.1. De l'architecture hybride à l'interaction tangible : continuité de l'espace physique et numérique

3.1.1. Continuité architecturale et urbaine

3.1.1.1. *Espaces à perception continue*

Avant la révolution numérique et la diffusion d'internet, l'architecture contemporaine - de bâtiment et urbanisme - pensait l'espace physique en termes d'« *espace à perception continue* » [Lynch 1960]. La continuité d'accès, qu'elle soit de nature perceptuelle, physique ou fonctionnelle (cf.

Figure 80), est fondatrice pour l'architecture de la conception des formes, des espaces et des circulations [Ching 2007]. Le *dispositif spatial* est conçu pour articuler les usages (habitat) et s'intégrer de façon continue à l'environnement et à l'existant (topologique, social, culturel, historique) [Borie 2006]. Pour l'urbanisme, Lynch crée le concept d'*imagibilité* des formes urbaines, ou leur capacité à faciliter la création d'images mentales partagées. La production de cette image est réalisée au travers de cinq types d'éléments fondamentaux : les voies ou *paths* (rues, lignes de transports...), les limites ou *edges* (murs, rives...), les nœuds ou *nodes* (jonctions de voies, places...) les points de repères ou *landmarks* (éléments remarquables) et les quartiers ou *districts* (identifiés par une unité sociale, fonctionnelle, architecturale...). Une forte *imagibilité* de l'espace urbain permet aux utilisateurs (habitants) de percevoir la ville comme une structure fortement continue, comme « *un enchaînement d'objets distinctifs entretenant des relations claires* ».



Figure 80 : L'architecture contemporaine favorise la continuité des espaces :
Shell villa, Japon, Nagano architecture (à gauche),
projet du nouveau Centre des Congrès de Nancy, Atelier Barani (à droite).

3.1.1.2. *Espaces à perception fragmentée*

Le développement de modes de transports rapides, individualisés ou hors surface (souterrain, aérien), l'allongement des distances de déplacement (travail, loisirs) et une dé-corrélation entre distance et temps de trajet ont fortement changé les usages et la perception des espaces urbains. Ainsi, la dimension temporelle prépondérante des déplacements basée sur le seul temps de trajet, transforme la représentation de l'espace physiquement parcouru (continu) en une *image-structure* plus abstraite formée d'un ensemble de nœuds ou points d'intérêt, et reliés par des connexions (telle une représentation de type *mé-tro*). Ce qui se passe entre ces points d'intérêt perd de son importance pour l'usager (comme les trajets domicile travail), ou est source de frustration, vécu par exemple comme une perte de temps (embouteillages). Les dimensions spatiales et temporelles, historiquement liées, se séparent et deviennent indépendantes. Perceptivement, cette structure par nœuds ne nécessite plus un espace à perception continue : les portions d'espace « utiles » deviennent perceptuellement indépendantes formant ainsi des espaces urbains « à perception fragmentée » [Cingolani 2010]. Dans le même temps, le développement de nouveaux moyens de communication dé-corrèle un peu plus l'espace physique de l'espace perçu, ou connecte virtuellement des espaces physiques distants, permettant par exemple de choisir ses amis sur internet ou de garder le contact avec sa famille sans partager le même espace urbain (quartier, ville).

L'installation « *Hole in Space* » (trouée dans l'espace), réalisée en 1980 par les deux artistes Kit Galloway et Sherry Rabinowitz, a relié perceptuellement par liaison satellite et pendant trois jours deux rues entre New York et Los Angeles (cf. Figure 81). Le public pouvait ainsi entrer librement en contact avec *l'autre côté* par l'intermédiaire d'images vidéo projetées en temps réel.



Figure 81 : En 1980, les artistes Galloway et Rabinowicz proposent un projet d'installation utilisant le système de communication par satellite pour relier pendant 3 jours deux rues entre la côte Est et Ouest de l'Amérique.

3.1.1.3. *Espaces architecturaux sensibles et continuité physique-virtuel*

Le développement des technologies numériques et leur diffusion dans les espaces privatifs (smartphone, domotique) et publics (réseaux sociaux, professionnels et territoriaux), associés aux nouveaux outils internet de stockage, de recherche et de navigation ou de communication, participent de cette transformation des espaces intimes, urbains ou planétaires en structures de nœuds connectés. L'usage « *ubiquitaire* » d'internet a pour conséquence de déformer encore davantage nos représentations des espaces, et de transformer la continuité spatiale et temporelle de notre appréhension de l'espace physique en une perception éclatée, située et connectée à une multitude d'espaces mixtes fragmentés et discontinus.



Figure 82 : Nouveaux espaces publics hybrides (à gauche), visualisation conceptuelle du modèle Aperture [Cingolani 2010] (à droite).

Ces transformations ont imposé l'émergence en architecture et en urbanisme de nouveaux concepts tels que *l'espace public hybride*, visant à penser cette complexité et à multiplier les connexions entre les deux espaces physique et virtuel. Elles ont imposé le développement de nouveaux paradigmes, modèles

et méthodologies pour la « *conception hybride* » dans la création architecturale. Cingolani et Chassagne [Cingolani 2010] formulent ainsi un « *Internet hyper-local, un espace - public - virtuel référé à une composante spatiale continue (une rue, un quartier, une ville) dont les usagers sont les citoyens partageant ce même espace physique* » (cf. Figure 82 à gauche). Ils proposent un paradigme : le modèle *APERTURE(S)* (cf. Figure 82 à droite), utilisant le concept d'« *espaces sensibles* » (*Sentient City*) [Di Siena 2009] pour définir un nouveau domaine d'études pour les disciplines de l'architecture et de l'urbanisme, et permettant une structuration de l'espace prenant en compte les matériaux virtuels. Ces espaces sont dits *sensibles*, car entretenant des *relations* avec leurs utilisateurs et pouvant interagir à leurs demandes. Le terme même d'*aperture(s)*, issu du mot latin *apertura* et signifiant ouverture ou orifice (ouverture du diaphragme en photographie), exprime l'idée de laisser traverser l'information entre physique et virtuel (et dans les deux sens), au travers l'édification de structures et d'objets filtres. Ce concept d'espace sensible étend ainsi le principe de *porosité* de l'architecture physique aux espaces numériques.

Ces questions de l'espace physique « sensible » à l'interaction de l'utilisateur et de la continuité entre monde physique et numérique sont au centre du projet Strip'TIC d'espace tangible augmenté.

3.1.2. Continuité des espaces interactifs entre mondes physique et numérique

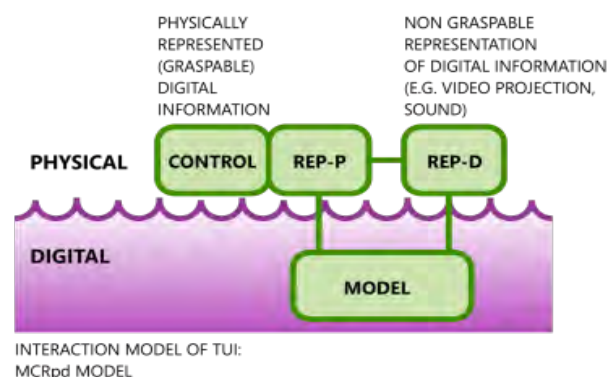


Figure 83 : Schéma du modèle MCRit des TUI de Ullmer & Ishii [Ullmer 2010]

Réalité Augmentée, Réalité Mixte, Interaction Tangible, Interaction Incarnée... toutes ces approches de l'interaction visent à une meilleure intégration des mondes physique et numérique. La Figure 83, issue des travaux de Ullmer et Ishii [Ullmer 2010] sur l'interaction tangible avec l'information numérique, illustre ce couplage fort recherché entre espaces numérique et physique. Entre données (modèle) ancrées dans l'espace numérique, représentations augmentées mêlant monde réel et projections et interacteurs (contrôleurs) physiques. Ces approches physiques de l'interaction ont pour point commun de prendre en compte les différentes modalités, capacités et performances du corps, notamment haptiques ou proprioceptives, et les affordances avec le monde réel [Fitzmaurice 1995]. Hornecker [Hornecker 2006] propose ainsi d'analyser les interactions physiques au travers de quatre perspectives pour le design : Tangible Representation, Spatial Interaction, Embodied Facilitation et Expressive Representation.

Néanmoins, dans de tels espaces interactifs centrés sur le monde physique, la cohérence entre représentations, dispositif physique de contrôle et modèle

de données est souvent relâchée ou peu harmonieuse. Par exemple, le dispositif de contrôle ne joue souvent que le rôle d'un substitut métaphorique [Fishkin 2004], qui permet à l'utilisateur de manipuler les données de façon performante en utilisant ses habiletés et connaissances préalables du monde physique, mais qui n'est pas un objet d'intérêt en soi. Koleva [Koleva 2003] propose de définir un degré de cohérence qui exprime comment les objets physiques et virtuels sont perçus comme la même chose.

Le projet Strip'TIC présente l'opportunité d'être adossé à une activité utilisant déjà une interface tangible : les strips papier. Cette particularité nous a permis d'explorer la conception d'un espace de design tangible dans lequel les strips papier sont à la fois des objets physiques d'intérêt premier, représentants principaux des avions eux-mêmes (« *c'est l'avion que je tiens dans ma main* »), du contrat de vol (données plan de vol) et de la responsabilité du contrôleur (objet juridique), mais aussi des objets de contrôle et d'interaction permettant de programmer l'action et l'activité. Les principes de continuité et de cohérence entre représentations physiques et numériques et de continuité de l'espace et des interactions ont donc été au cœur du travail de recherche sur ce projet.

3.2. Un espace interactif tangible basé sur le strip papier

3.2.1. Contexte de recherche

Strip'TIC (Stripping Tangible Interface for Controllers) est un projet de recherche mené en collaboration entre le domaine R&D de la DSNA/DTI et le Laboratoire d'Informatique Interactive (LII) de l'ENAC. Ce projet a abouti en 2011 à l'élaboration d'une plateforme prototype de recherche (cf. Figure 79), visant à explorer un espace mixte de design entre tableau de strips physiques augmentés, écrans et interfaces système ATC (Air Traffic Control), et interactions tangibles.

Cette plateforme prototype multimodale (voir 3.2.3.1) a permis de mener de nombreuses observations et ateliers avec les contrôleurs aériens, visant à identifier les besoins de l'activité (voir 3.2.2). Elle a permis de conserver la pertinence métier et les performances des méthodes de travail et interactions physiques existantes en opérationnel avec les strips papier, tout en développant avec les contrôleurs une augmentation de l'information et de nouvelles interactions dans cet espace mixte de design entre physique et numérique (voir 3.2.3.2).

Ce projet collectif a été mené pendant plus de trois ans par une équipe de chercheurs de la DSNA/DTI et de l'ENAC. Notamment : Rémi Lesbordes, un contrôleur aérien de la DSNA spécialiste de l'approche et qui a contribué de façon majeure à l'élaboration matérielle du prototype, à la conception, au développement de plusieurs fonctions logicielles, et à l'interface avec les contrôleurs aériens. Christophe Hurter, qui a initié et développé l'architecture logicielle et technique du prototype et participé à toutes les phases du projet. Catherine Letondal, Stéphane Conversy et moi-même pour les phases d'analyse ethnographique, de conception et de prototypage. Strip'TIC a donné lieu à plusieurs publications internationales [Hurter 2012][Letondal 2013][Vinot 2014], et donné lieu à de nombreuses présentations et démonstrations.

3.2.2. Contexte d'activité : contrôle aérien d'approche et stripping

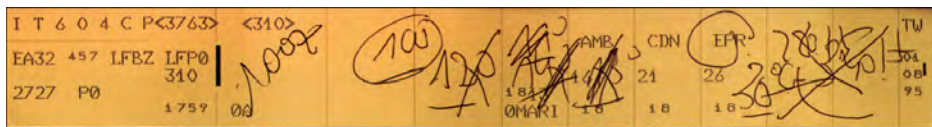


Figure 84 : Un strip papier de contrôle en-route avec les informations imprimées de plan de vol et les annotations et instructions manuscrites du contrôleur

Les contrôleurs aériens (ATCo) ont pour mission principale de garantir la sécurité opérationnelle des vols et de réguler le trafic aérien dans un secteur d'espace contrôlé. Ils préviennent les collisions entre aéronefs (et entre aéronefs et mobiles sur les aéroports) en assurant une séparation minimale, verticale et sur le plan horizontal, des avions. Ils organisent le trafic aérien contrôlé sur les routes aériennes, séquentent et mènent à destination les avions en donnant des instructions de vol, ou autorisations (clearances), de cap, vitesse, altitude, etc., aux pilotes. En France et dans d'autres pays, les contrôleurs aériens utilisent des *strips*, papier (cf. Figure 84) ou électroniques, qui représentent les avions contrôlés traversant leur secteur.

3.2.2.1. Le contrôle aérien en France

■ Phases du vol, espace contrôlé et secteurs de contrôle

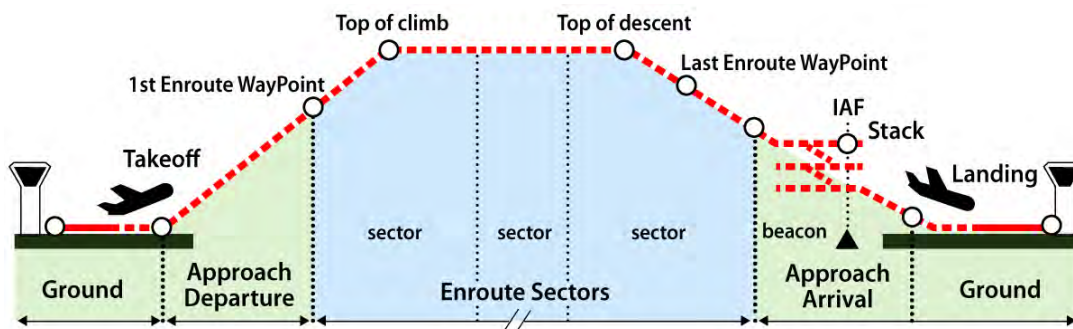


Figure 85 : Schéma de principe des phases de contrôle, les secteurs d'approche (en vert) concernent le début (après le décollage) et la fin (avant l'atterrissage) du vol.

L'espace aérien contrôlé est divisé en secteurs de contrôle, correspondant à des volumes d'espace ; chaque secteur étant placé sous la responsabilité d'une équipe de contrôleurs ou position de contrôle. Le transfert du vol d'un secteur au secteur suivant, sur la base d'un plan de vol déposé à l'avance, permet de contrôler l'avion de l'aéroport de départ à l'aéroport d'arrivée (*Gate to Gate*). Les contrôleurs en charge du secteur doivent éviter les conflits potentiels, par exemple une perte de séparation, appelée *airmiss*¹, entre avions dans l'espace contrôlé et avec les secteurs adjacents, et livrer chaque vol au secteur suivant, en toute sécurité et selon des procédures établies. La Figure 85 présente la distribution des types d'espace contrôlé du vol depuis le sol : contrôle d'aérodrome ou de tour (TWR) pour le décollage, secteur d'approche (APP) départ pour la montée de l'avion jusqu'à la première balise en-route, secteurs en-

¹ Le terme *Airmiss* définit une perte de séparation spatiale minimale entre deux vols, pouvant impliquer un risque de collision entre avions, et qui enclenche une alarme automatique sur l'image radar appelé « filet de sauvegarde ».

route successifs (en bleu) pour le vol de croisière en niveau supérieur (CRNA), puis descente et secteur d'approche (APP) arrivée jusqu'à l'atterrissage pris en charge par les contrôleurs de tour (TWR).

■ Contrôle d'approche et de tour

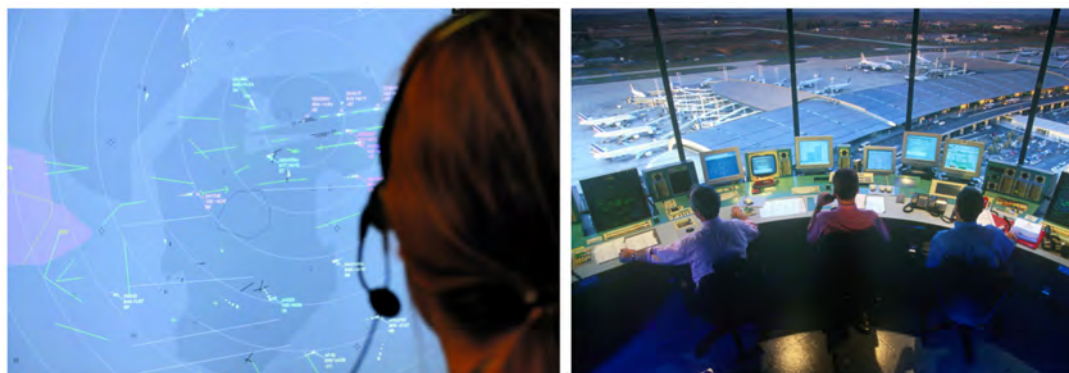


Figure 86 : Écran radar de contrôle aérien d'approche (à gauche), contrôleurs aériens en vigie de l'aéroport CDG (à droite).

La particularité du contrôle d'approche est de réguler le trafic aérien à proximité des grandes plateformes aéroportuaires comme Paris-Charles-de-Gaulle (CDG) en séparant les différents flux avions : atterrissages et décollages, plateformes aéroportuaires et aéroports associés, vols traversiers. Les zones de forte densité comme la région parisienne intègrent des approches terminales spécialisées à leur configuration (Figure 86 à gauche). Les contrôleurs de tour, ou vigie (Figure 86 à droite), gèrent le trafic aéroportuaire. Ils font atterrir et décoller les avions sur les pistes (contrôleur LOC) et gèrent le roulage au sol de l'avion sur les taxiways jusqu'aux portes d'embarquement (contrôleur SOL).

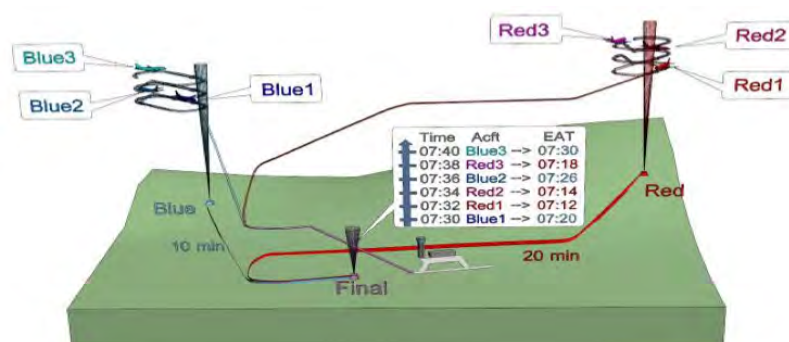


Figure 87 : Schéma de principe des stacks (ici Blue et Red) et calcul des heures d'arrivée prévues et de l'*Estimated Approach Time* (EAT) de séquençage des sorties de stacks.

Avec l'évolution du trafic aérien, le contrôle d'approche des grandes plateformes aéroportuaires comme Paris CDG tend à se rapprocher des capacités maximales des pistes, c'est-à-dire le nombre de décollages ou atterrissages par heure. Pour optimiser le trafic, les contrôleurs séquençent en amont les vols pour augmenter autant que possible la fréquence de rotation des avions sur la piste : un avion toutes les 30 secondes à Roissy ou Orly. Lorsque la capacité des pistes est dépassée, les contrôleurs peuvent retarder l'arrivée des avions en les empilant verticalement dans un *stack*, procédure d'attente en hippodrome des vols (cf. Figure 87). D'autre part, les aéronefs en phase d'approche sont fortement évolutifs, verticalement en descente ou en montée, mais aussi

en vitesse et en cap, et convergent dans un secteur d'espace restreint vers la plateforme. Enfin, les procédures d'atterrissage et de décollage des avions constituent les deux phases les plus critiques du vol. Ces caractéristiques du contrôle d'approche et de tour, avec des contraintes temporelles et spatiales conséquentes présentent des risques majeurs en termes de sécurité aérienne. Elles engendrent une forte charge cognitive pour les contrôleurs aériens et exigent une collaboration importante entre opérateurs. Aussi l'activité de contrôle nécessite des outils et interfaces système adaptés, très spécifiques, et performants.

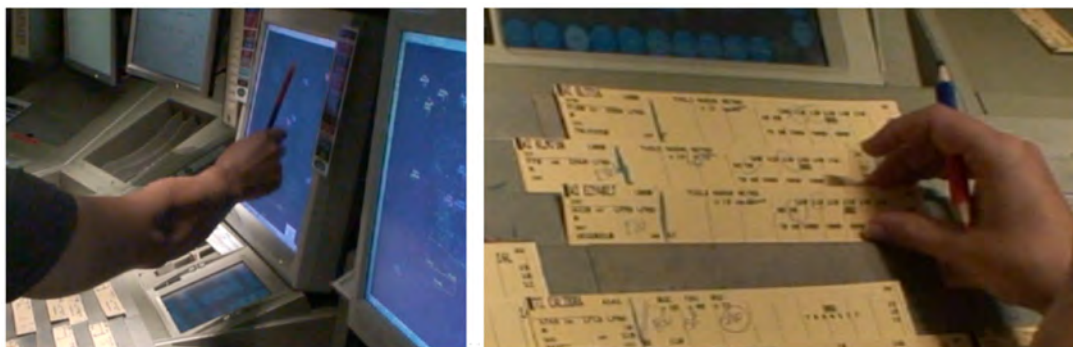


Figure 88 : Contrôle d'approche : écran radar et tableau de strips

■ Les outils du contrôleur aérien

Les contrôleurs d'approche gèrent le trafic aérien à l'aide de trois outils principaux. La fréquence (radio) qui permet de communiquer avec les avions et de donner les instructions de contrôle, ainsi que deux interfaces de visualisation du trafic et de planification des actions : une image radar et un tableau de strips. L'image radar (cf. Figure 88 à gauche) affiche sur écran l'évolution en temps réel des avions du trafic, avec les informations du système CAUTRA² : position radar des vols, informations *plan de vol*, route aérienne, paramètres avion descendant. Le tableau de strips (Figure 88 à droite) permet au contrôleur d'organiser le trafic et de planifier son activité à partir de représentations « plan de vol » de chaque aéronef « en responsabilité » pendant sa traversée du secteur. Ces représentations sont appelées des *strips*, car constituées sous la forme d'une bande de papier (cf. Figure 84). Les strips sont imprimés sur la position (imprimante à strips), environ 10 minutes avant l'entrée de l'avion dans le secteur contrôlé, avec un ensemble structuré d'informations ATC concernant le vol. Sur la partie gauche du strip, un cartouche rassemble les données « identitaires » de l'avion et comporte entre autres l'identifiant ATC du vol, ou *callsign*, la compagnie, le type d'avion et les aéroports d'origine et de destination. Le reste du strip à droite, est réservé aux informations relatives à la traversée du secteur, et découpé en zones : zone « niveaux » de vol et vitesse et zone « route » composée d'une liste de *balises* correspondant à la route prévue au plan de vol avec les heures et minutes estimées de passage. Les strips sont placés au fur et à mesure de leur impression sur le tableau, intégrés par les contrôleurs dans leur connaissance du trafic, organisés et déplacés en fonction de l'évolution du vol et de la position dans la séquence ou dans le flux de vols (par exemple descendus vers une ligne basse représentant la piste) et transmis si besoin au contrôleur suivant. Ils sont annotés (valeurs, textes, tracés) par les contrôleurs pour préparer et donner les instructions de

2 En France, les services de contrôle aérien sont rendus par le système CAUTRA (système de Coordination AUTomatique du TRafic Aérien) qui regroupe les services de traitement des plans de vol, de traitement radar et de visualisation radar (ODS)

contrôle (clearances), particulariser le strip (ex. warning), partager ou communiquer avec d'autres contrôleurs.

3.2.2.2. Évolution des interfaces contrôleurs : strips papier, électroniques ou stripless

L'évolution constante des interfaces de contrôle répond essentiellement à deux besoins : garantir la sécurité aérienne et augmenter la capacité de contrôle pour répondre à l'augmentation prévue du trafic aérien. Il s'agit aussi de moderniser et d'harmoniser les différents systèmes de contrôle aériens, notamment par le déploiement de nouveaux concepts, procédures et outils basés sur l'optimisation des trajectoires et sur une utilisation intensive de l'automatisation. Les projets NextGen [NextGen 2013] au USA, et SESAR [SESAR 2007] en Europe, répondent à ces besoins.

3.2.2.2.1. Du strip papier au « stripless »

La procédure de contrôle au strip dans le contrôle aérien est un exemple remarquable de conception utilisateur. Simple bande « technique » imprimée au départ, la composition précise de ses informations, l'usage du tableau de strip et les procédures de contrôle afférentes, ont été peu à peu élaborés par les contrôleurs eux-mêmes, pour adapter au mieux cet outil aux spécificités de contrôle de chacun des centres et types de contrôle. En 2000, la mise en place du système ODS en France par la DSN a permis de moderniser les systèmes *en-route*, et notamment l'image radar de la position de contrôle, passant du scope radar à balayage aux écrans et affichages numériques, tout en conservant pour des raisons de sécurité la procédure de contrôle aux strips à l'aide du tableau de strips papier.

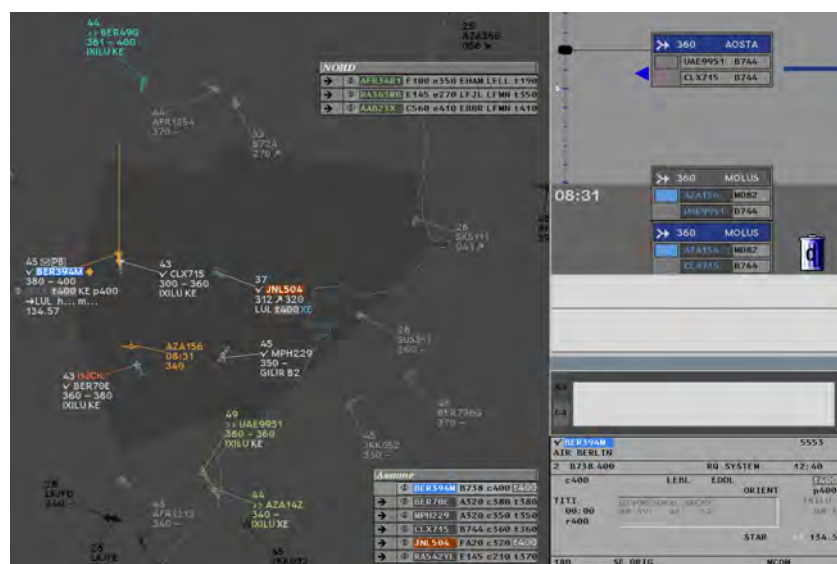


Figure 89 : Image radar d'études ODS-Érato, avec listes de vols (dyps), agenda Érato et strip électronique du vol sélectionné (en bas à droite)

Malgré la qualité et la performance du contrôle avec les strips papier [Mackay 99], l'interaction avec le tableau et les informations portées manuellement sur les strips restaient non « connues » par le système ATC et donc non utilisables pour le partage d'informations ou l'anticipation de conflits par le système. En conséquence, de nombreux pays, dont la France ont étudié des interfaces de contrôle sans strips papier, communément appelées « *stripless* ». La Figure 89 présente une interface d'études ODS-Érato, basée sur les travaux du projet

Érato [Leroux 1993], intégrant à l'image radar des listes de vols organisées par balises de sortie du secteur, et l'affichage latéral d'un agenda permettant de gérer les conflits potentiels entre avions et d'un strip électronique présentant les informations *plan de vol* du vol sélectionné. Ces éléments et outils ont pour vocation de remplacer l'usage du tableau de strips papiers et de permettre des interactions renseignant le système. De tels systèmes sont encore en phase pré-opérationnelle en France, mais sont déployés dans d'autres pays européens.

3.2.2.2. Premiers strips papier augmentés : *Caméléon*

EN 1998 et après une étude ethnologique de 4 mois menée en immersion au sein d'une équipe du centre régional de contrôle en-route d'Athis-Mons (CRNA Nord), Wendy Mackay [Mackay 1999] analysait les bénéfices de l'usage des strips papier pour le contrôle aérien et proposait l'idée de les conserver en les connectant au système d'information ATC. Le prototype *Caméléon* [Mackay 1998] propose ainsi l'ébauche d'un dispositif d'interface tangible de stripping pour l'ATC (cf. Figure 90).

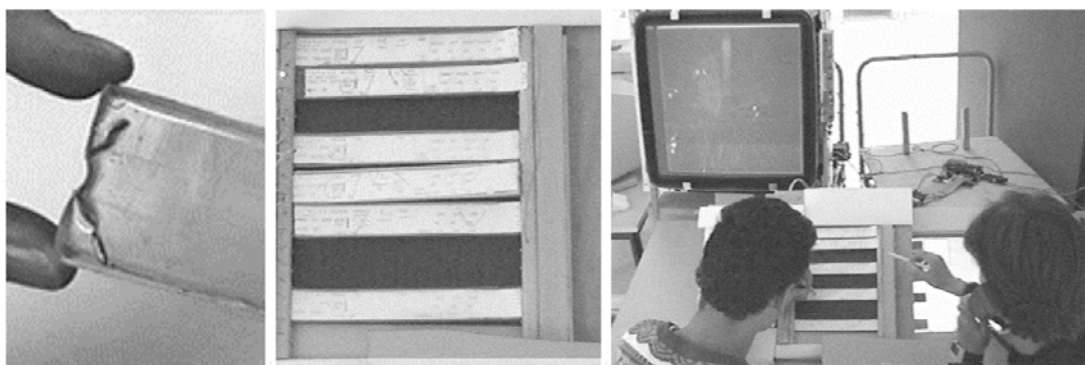


Figure 90 : Caméléon, prototype d'un tableau de strips augmentés. (à gauche) le porte-strip en résine incluant une résistance électrique, (au centre) une colonne de strips sur leur porte-strip, (à droite) interactions entre tableau de strips et image radar

Dans Caméléon, un tableau de strips physique permettait de positionner des porte-strips en résine sur une colonne. Chaque porte-strip intégrait une résistance électrique (incluse au moulage) avec une valeur de résistance unique (Figure 90 à gauche). Des contacts électriques, situés régulièrement sur les bordures de la colonne, permettaient d'identifier la valeur de résistance du porte-strip inséré à cet endroit et donc la présence et la position des strips sur le tableau (Figure 90 au centre). Le tableau était lui-même posé sur une tablette numérique qui permettait d'enregistrer les tracés réalisés au stylo sur les strips et de les restituer numériquement sur un écran ou de réaliser des interactions entre strips et interface radar, comme celle d'un « tap » réalisé avec la main sur un strip qui entraînait un feedback de désignation du vol correspondant sur l'image radar (Figure 90 à droite).

3.2.2.2.3. Strips électroniques : De *DigiStrips* à *SmartStrips*

Dû à une insuffisante maturité des technologies tangibles à la fin des années 90, le concept innovant de Caméléon est resté à l'état de prototype non utilisable pour des études opérationnelles. Le CENA (Centre d'études de la Navigation Aérienne) a de ce fait, repris les enseignements de Caméléon pour mener des travaux de recherche sur des outils de « stripping électronique » basés sur l'usage d'écrans tactiles, d'interactions gestuelles et d'animations.

Le projet DigiStrips [Mertz 2000] conduit par Christophe Mertz et moi-même aboutissait en 1998 à la réalisation d'une interface pour le contrôle aérien *en-route* de tableau de strips électroniques [Mertz 1998]. DigiStrips intégrait quatre concepts innovants pour l'époque : l'interaction tactile, la reconnaissance de gestes, le design graphique et les animations [Mertz 1999]. J'ai personnellement conçu et développé les deux premières versions de DigiStrips (cf. Figure 91) : interactions gestuelles et code logiciel³ design graphique, animations et feedbacks.

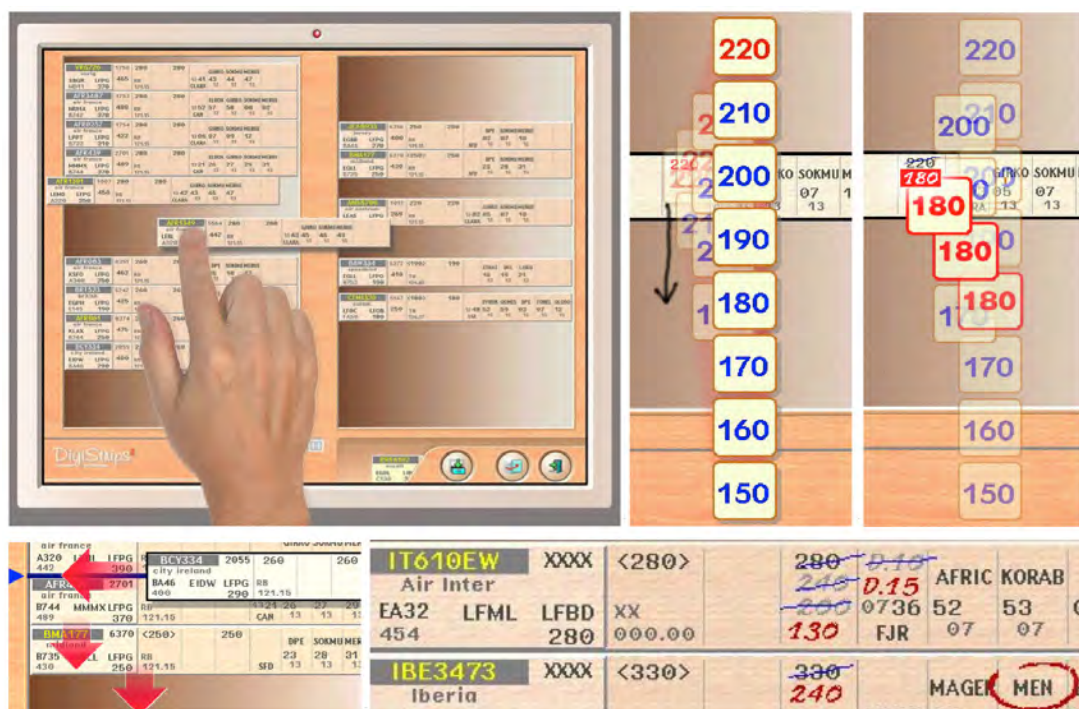


Figure 91 : DigiStrips (v2 1998), une interface de stripping électronique basée sur l'interaction tactile, la reconnaissance de geste, l'animation et le design graphique

3.2.2.2.4. DigiStrips : Continuité gestuelle, spatiale et visuelle

Dans DigiStrips, l'utilisation d'écrans résistifs permettait aux contrôleurs d'interagir indifféremment au doigt ou avec un simple stylo, directement sur les strips, pour organiser librement les strips sur le tableau (Figure 91 en haut à gauche), préparer et donner des instructions de contrôle (Figure 91 à droite), sélectionner des vols par filtrage ou écrire des annotations libres. Le moteur de reconnaissance de gestes développé spécifiquement pour DigiStrips offrait une reconnaissance en continu du geste permettant des transitions entre états et interactions. Par exemple un geste initial vertical [push] à partir d'un strip, qui avait pour conséquence de dynamiquement pousser les strips sur la colonne, se transformait en déplacement [move] du strip si le geste changeait de direction. De plus, la direction et la forme du geste, ainsi que la zone de départ du geste, permettaient de déclencher des interactions en cohérence de sens et d'action avec ce geste, par exemple un geste vers le haut ou vers bas à partir de la zone de saisie d'altitude du strip ouvrait un interacteur de saisie de *niveau* en montée ou en descente (Figure 91 en haut à droite), un geste en « pont » entre deux balises de route saisissait une instruction de *directe* (route directe vers une balise). Surtout, les strips n'étaient pas dupliqués sur

³ Les 2 premières versions de DigiStrips ont été programmées en Scheme, un langage dérivé du Lisp, et interfacé avec Yaw, une Toolkit très innovante développée au CENA par Patrick Lecoanet qui donnera naissance à TkZinc.

la position (paradigme de l'objet papier unique), les contrôleurs pouvaient néanmoins se passer (transmettre) un strip entre positions DigiStrips (par exemple entre positions organique et radariste).

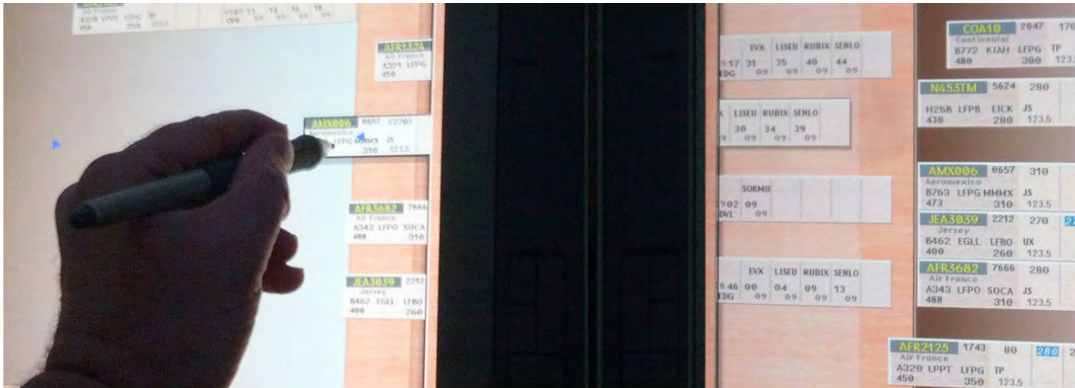


Figure 92 : Digistrrips, continuité visuelle et interactive entre tableaux de strips des contrôleurs organique et radariste

Le strip placé sur la bordure d'un tableau de strips (correspondant au bord de l'écran) dépassait alors sur le tableau de l'autre contrôleur (cf. Figure 92), visuellement situé à cheval entre les deux écrans. Il pouvait alors être bougé d'un côté - ce qui bougeait de façon synchrone l'autre partie du strip sur l'autre écran - pour attirer l'attention du binôme. Il pouvait être tiré par le destinataire pour être intégré sur son propre tableau ; une animation le faisant alors disparaître de façon synchrone sur l'écran d'origine du transfert. Les animations, finement « designées » et couplées au design graphique, jouaient un rôle essentiel de feed-forward⁴. Par exemple, le comportement synchrone de réorganisation dynamique des piles de strips pendant l'interaction gestuelle pour permettre un contrôle efficace des interactions continues. Ou le rôle des indicateurs d'insertions dans la pile (Figure 91 en bas à gauche) et des feedbacks pour renforcer visuellement l'exécution et la notification d'une clearance (cf. Figure 91 en haut à droite).

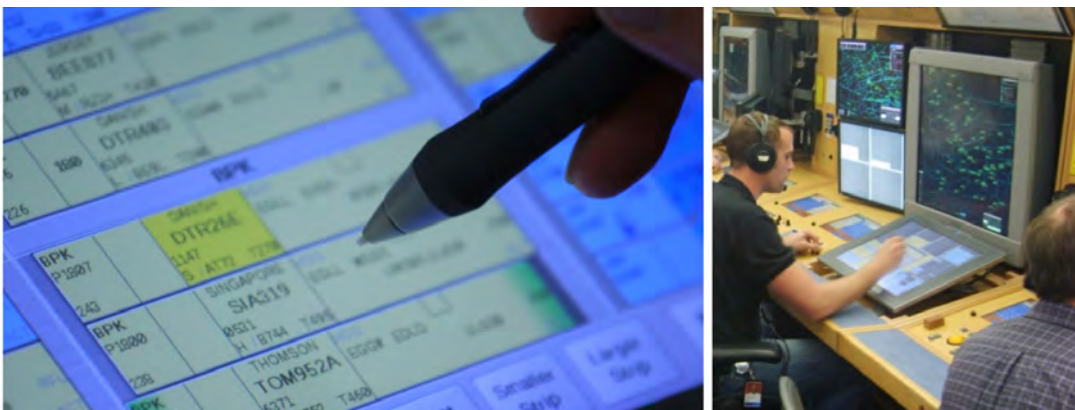


Figure 93 : *SmartStrips*, un système de stripping électronique basé sur DigiStrips et développé par Frequentis pour les centres de contrôle en-route et approche.

Ici au centre de contrôle du NATS à Prestwick (London, UK)

DigiStrips a fait l'objet de nombreuses publications dont [Mertz 1998] [Mertz 1999][Mertz 2000][Mertz 2002], et a donné lieu à deux dépôts de brevets

4 Contrairement au feedback qui permet à l'utilisateur un contrôle a posteriori (rétroactif) de son action, le codage perceptuel d'un feedforward permet à l'utilisateur d'anticiper l'action contextuelle possible ou le résultat d'une interaction engagée, par exemple le changement contextuel de forme d'un curseur au survol d'un objet d'interaction ou le résultat localisé d'un événement release comme le lâché d'un objet au cours d'une interaction de Drag&Drop

industriels. Ses spécifications, guidelines IHM, retours d'expérience et spécifications graphiques, techniques et d'interaction, ont fait l'objet d'un rapport technique [CENA/R01-003], qui a été fourni à des industriels avec une convention d'usage. Plusieurs de ces industriels ont repris et développé les idées et techniques de DigiStrips pour la conception et le développement IHM de leurs produits, comme la société Intuilab à Toulouse. Dans le cadre de l'ATC, la société Frequentis a développé une ligne spécifique d'outils pour les opérateurs de contrôle aérien, *smartStrips* (cf. Figure 93), dont des instances sont déployées en service opérationnel au Royaume-Uni depuis 2011 dans les centres de contrôle en-route et d'approche du NATS (National Air Traffic Services) et prochainement sur l'aéroport de Hong Kong.

Enfin, DigiStrips a inspiré de nombreux projets de recherche comme Vigiestrips, ASTER, MAMMI.

3.2.2.2.5. ASTER : transition continue entre vue « radar » et vue « tableau »



Figure 94 : Interface Aster pour le contrôle des secteurs terminaux réalisé par le CENA avec Intactile Design

Débuté en 2001, le projet ASTER (Assistant pour les Secteurs TERminal) [Benhacène 2005][Merlin 2008], avait pour but l'étude d'un outil de stripping électronique, spécialement adapté pour les secteurs terminaux, E-TMA⁵. Il permettrait la saisie rapide des instructions de contrôle, tout en conservant certains avantages du strip papier. Aster, réalisé par le CENA⁶, avec l'aide des sociétés Intuilab et Intactile Design, avait adopté des principes de design inspiré de DigiStrips. Par exemple la coopération d'usage pour les contrôleurs (cf. Figure 94 à gauche) entre deux interfaces. Une représentation radar frontale représentant le trafic en temps réel (interface de supervision tactique) et un espace tactile de stripping électronique plutôt horizontal dédié à la planification et la programmation des actions de contrôle (interface d'exploration et de résolution stratégique), et aux saisies d'instruction et à la coopération entre contrôleurs. La particularité d'Aster était d'afficher les vols sur une projection verticale du secteur (cf. Figure 94 à droite) : l'axe des X représentant la distance au point de livraison (IAF), et l'axe des Y l'altitude (niveau de vol) des avions. Cette projection permettait de mieux visualiser la progression de vols fortement évolutifs (en montée ou en descente) et leur séquençement vers le point de livraison. Une architecture en couches permettait également une transition visuelle continue, pilotée par le « slider concrétisé » (*Touch Strip*)

5 E-TMA (Extended Terminal Maneuver Area) : secteurs d'approche terminaux, situés en amont des grandes plateformes aéroportuaires comme les aéroports de la région parisienne Roissy Orly, et permettant d'organiser et de séquencer le trafic en flux d'avions spatialement et temporellement régulièrement espacés.

6 Pendant la durée du projet, le CENA est devenu le département R&D de la DSN/DTI

des écrans tactiles Wacom *Cintiq*, entre deux modes de représentation. Une vue de type « tableau », avec des représentations de strips et une organisation proche de l'environnement actuel des contrôleurs. Une vue de type « radar », où le strip se transforme en étiquette de vol sur une représentation en coupe *verticale* de l'image radar [Merlin 2007]. Le contrôleur pouvant ainsi choisir l'une ou l'autre, mais surtout fusionner les deux vues en plaçant librement le curseur entre ces deux vues. Cette fusion permettait d'agir de façon continue sur la visibilité des informations du contexte ATC, et de mixer à volonté les modes de représentation tableau de strips et image radar.

3.2.2.2.6. MAMMI : travail coopératif et continuité temporelle



Figure 95 : Projet de recherche Mammi, financé par Eurocontrol et mené en partenariat par l'ENAC, Intuilab et Intactile Design

Le projet de recherche M.A.M.M.I (Multi-Actors Man Machine Interfaces), mené par l'ENAC (LII) et les sociétés Intuilab et Intactile Design propose d'explorer des situations de travail coopératif pour les aiguilleurs du ciel, sur table tactile multipoint. MAMMI [Conversy 2011], à partir de sessions d'observation de situations collaboratives entre contrôleurs, identifiait des exigences et principes de design pour un futur système ATC. Et proposait un ensemble d'outils et de techniques d'interaction basé sur l'usage d'une surface interactive partagée par les contrôleurs avec une table interactive multitouch et multi-utilisateurs.

L'un des aspects intéressants de MAMMI pour notre problématique de continuité concerne la représentation et l'instrumentation de la dimension temporelle. Tout d'abord, MAMMI intègre un feedback de *rémanence* du déplacement des strips, comme une trace diffuse du geste laissée sur le support, similaire à la comète radar des images radar, et disparaissant peu à peu (cf. Figure 95 à gauche). Cette trace éphémère, en créant une saillance visuelle des gestes, permet une conscience mutuelle (*mutual awareness*) entre contrôleurs de leurs actions respectives. De plus, MAMMI propose de nombreux outils basés sur le temps pour la planification coopérative et la programmation de l'action. L'interface permet par exemple de réaliser une extrapolation temporelle de la trajectoire d'avions ; ou d'utiliser une représentation de type « timeline » organisée en deux flux temporels, animés de façon continue, et convergents des bords gauche et droit vers le centre de l'interface. Chaque flux (gauche et droit) représente la responsabilité d'un des deux contrôleurs. Cette sorte d'*agenda* permettait ainsi d'allouer la responsabilité entre contrôleurs en déposant sur l'un des flux des « post-it » qui réifiaient une mémorisation ou une action à réaliser, par exemple une instruction de contrôle, une annotation graphique ou sonore (note vocale enregistrée). L'animation continue de la timeline déplaçait progressivement les post-it vers le centre qui représente le temps présent.

3.2.3. Strip'TIC : une plateforme d'interaction mixte pour l'ATC

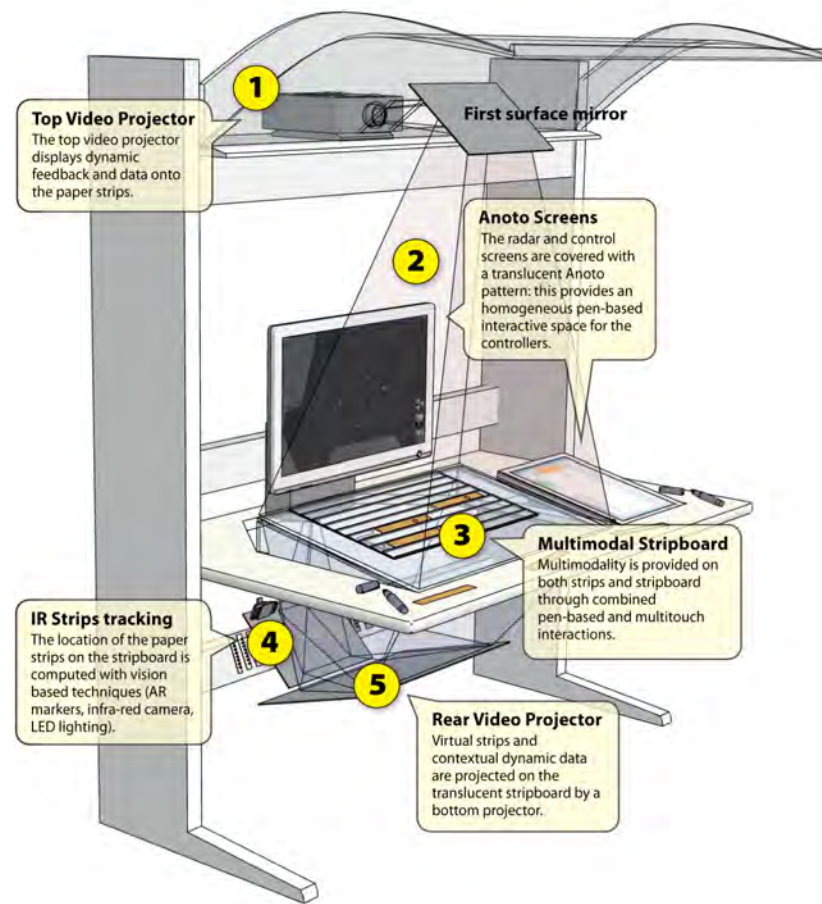


Figure 96 : Le dispositif Strip'TIC (V2) intégré à un meuble de contrôle.

Les systèmes interactifs présentés précédemment, et développés après Caméléon, sont basés sur l'usage de strips numériques et d'interactions tactiles. Les interfaces de stripping développées pour l'opérationnel sont également basées sur l'affichage de strips électroniques. Le projet Strip'TIC, reprend les idées de Caméléon mais aussi l'expérientiel des strippings numériques pour développer une approche novatrice associant interface tangible, strips papier augmenté, strip virtuel, image radar et système ATC.

La réalisation du prototype V2 de Strip'TIC (cf. Figure 96), détaillé ci-après a débuté fin 2011 à partir de l'expérience acquise et des enseignements des phases de conception et prototypage des deux premières versions (V0,V1). Le travail conséquent a été mené avec la coopération de nombreuses personnes, contrôleurs, étudiants, chercheurs, ingénieurs. Le prototype lui-même a été réalisé plus particulièrement pour la partie logicielle par Christophe Hurter (architecture logicielle, interface radar et interactions ATC, tracking vidéo des strips, feedbacks) et par Rémi Lesbordes pour la construction de la structure physique (position, réalisation du tableau de strip en verre), pour l'ingénierie du dispositif (vidéo projection, miroir, capteurs infrarouges, capteurs multitouch) et pour la conception des fonctionnalités ATC de Strip'TIC. La réalisation de ce prototype nous a permis de conduire une phase très importante d'exploration (exploratory design), incluant des ateliers de conception avec les contrôleurs aériens, un prototypage participatif itératif, des séances de design walkthrough pour l'évaluation des interactions, et des démonstrations à de très nombreux contrôleurs de différents pays... Cette phase d'exploration et les publications autour de Strip'TIC sont une contribution collective incluant

plusieurs chercheurs du Laboratoire LII de l'ENAC. Il faut souligner plus particulièrement les contributions de Catherine Letondal, Christophe Hurter, Rémi Lesbordes et Stéphane Conversy. Une publication à AVI 2012 présente en détail le dispositif interactif de ce prototype Strip'TIC [Hurter 2012].

3.2.3.1. Description du dispositif interactif de Strip'TIC



Figure 97 : Le tableau de strips de strip'TIC, réalisé en verre, permet aux contrôleurs d'aligner les strips papier, au fond l'image radar

Le dispositif Strip'TIC présenté par la Figure 96 et mis en situation par la Figure 97 reproduit une position de contrôle aérien d'approche. Elle intègre les deux composants majeurs d'une position opérationnelle actuelle :

- une image radar frontale (située face aux contrôleurs), qui affiche en temps réel les informations de trafic aérien pour le secteur en compte sur un écran 30» LCD, le format standard des positions ATC Mage (Figure 97, coté gauche).
- un tableau de strips, support physique de rangement et d'organisation des strips papier, composé d'une surface en verre horizontale légèrement orientée (environ 15°) et présentant un relief de lignes physiquement délimitées (voir Figure 97), qui permet aux contrôleurs de positionner les strips papier représentant les vols en compte du secteur et de planifier son activité de contrôle.

■ Interaction continue avec le stylo Anoto

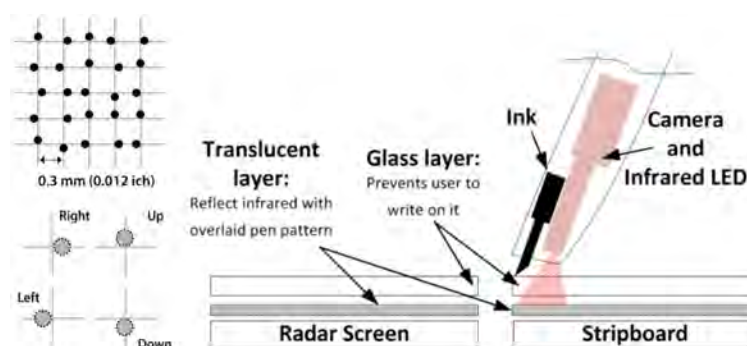


Figure 98 : Le pattern Anoto (à gauche), adaptation pour Strip'TIC des surfaces de projection pour l'utilisation du stylo Anoto (à droite).

La technologie Anoto de stylo électronique [Anoto] est basée sur l'utilisation d'une surface imprimée avec un pattern de point - Digital Dot Pattern (DDP)

- et d'une caméra infrarouge embarquée dans le stylo et permettant de lire ce pattern. Le pattern de point, très simple avec 4 positions : en haut, à gauche, en bas, à droite (cf. Figure 98 à gauche), permet de composer, et d'imprimer de façon pratiquement invisible sur des matériaux divers, une surface d'adressage. La caméra prend des images (snapshot) d'une section de point de la trame située sous le stylo, avec une fréquence de 50 à 100 images par seconde, qui permet d'enregistrer les coordonnées uniques de la partie de trame survolée et de les exporter dynamiquement sous forme d'événements (via Bluetooth ou USB) afin de permettre leur utilisation par le système interactif. La grande majorité des surfaces du prototype est recouverte avec un tramage Anoto : les strips papier sont imprimés avec des sections particulières de trame Anoto ; la surface du tableau de strips, les écrans radar ou secondaire, ainsi qu'une tablette, sont couverts avec la trame Anoto. Les écrans et le tableau ont été recouverts par 2 couches de film, un film translucide spécifique imprimé avec le pattern, et un deuxième film transparent (voir Figure 98 à droite), spécialement étudiés pour être à la fois compatibles avec la projection lumineuse le traversant (projection vidéo et LCD) et permettre la lecture infrarouge du stylo. Cette généralisation d'un tramage Anoto sur des surfaces techniques très diverses a demandé beaucoup d'efforts d'adaptation et d'essais. Elle constitue l'un des apports du projet Strip'TIC.

Cette utilisation généralisée de la trame Anoto sur les différents plans et surfaces du prototype permet une « continuité » de l'interaction avec le stylo numérique sur l'ensemble du dispositif Strip'TIC.

■ Repérage des strips sur le tableau

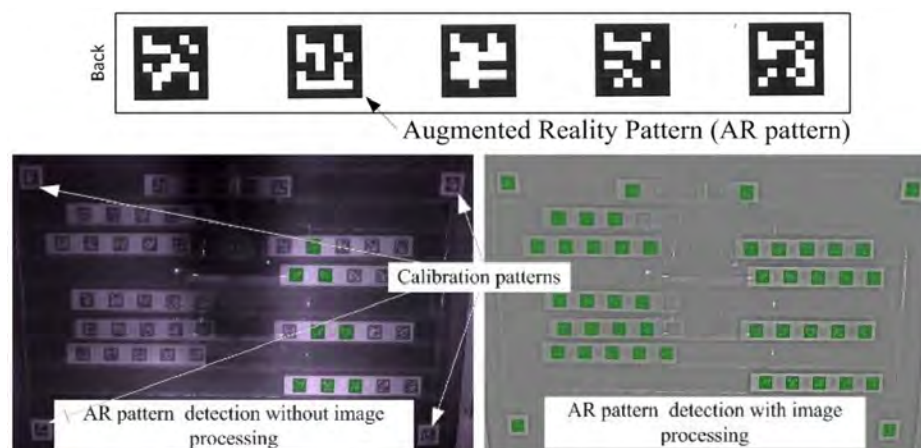


Figure 99 : Pour repérer les strips, l'image IR d'une caméra située sous le tableau est traitée (filtre vidéo) pour identifier les patterns AR imprimés au dos des strips

Un deuxième aspect technique essentiel au dispositif, qui a demandé un travail d'ingénierie et de tuning logiciel important, correspond à la nécessité de pouvoir repérer automatiquement et d'identifier les strips posés sur le tableau. Dans Strip'TIC, le système de tracking est basé sur la détection vidéo continue de tags de réalité virtuelle (Augmented Reality), utilisant l'environnement de programmation ARToolkit⁷ développé à partir de 1999 par Billinghurst et Kato au HITLab. Une configuration unique de 5 patterns est imprimée au dos du strip papier (Figure 99 en haut) et la détection est réalisée par une caméra située en dessous du tableau de strips. Le support en verre transparent étant couvert d'un film translucide, imprimé avec la

⁷ ARToolkit, <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit>

trame Anoto, l'image vidéo doit subir un traitement important comme montré par les deux images de la Figure 99 : à gauche, l'image avant traitement, à droite l'image nettoyée par traitements successifs. Sur ces deux images, les feedbacks verts indiquent les patterns identifiés. Peux nombreux à gauche, leur bonne identification globale sur l'image de droite et la redondance des patterns permet une reconnaissance suffisante des strips posés sur le tableau et un suivi de leurs déplacements.

■ Projections vidéos

La troisième composante du dispositif est la projection vidéo qui permet d'afficher dynamiquement les données du système ATC et les feedbacks des interactions utilisateurs sur les objets et plans tangibles. Deux projecteurs, situés au-dessus de la position et en dessous du plan de travail, projettent ces informations. Le projecteur haut permet l'affichage sur les strips d'informations supplémentaires de type réalité augmentée (feedback, données plan de vol augmentées comme le logo de la compagnie, données dynamiques avion comme le suivi des niveaux de descente ou montée, calculs opérés par le système sur demande, annotations...) Le projecteur bas, sert à l'affichage du strip virtuel sous le strip papier, à l'extension interactive de ce strip ou à générer des feedbacks comme la sélection aux bordures du strips. Il sert également à afficher des widgets interactifs, comme des boutons de contrôle sur les bords du tableau. La section 3.4.1 reprend cet aspect des projections vidéos et développe tout particulièrement le principe de fusion des impressions physiques et lumineuses.

■ Interaction multimodale du tableau de strips

En plus de ces trois composantes, une modalité d'interaction multitouch a été ajoutée au dispositif par l'ajout de barres de capteurs infrarouges, situées sur les côtés gauche et droit du tableau de strips et permettant d'utiliser des gestes au doigt sur l'ensemble de la surface du tableau.

3.2.3.2. Observations des contrôleurs aériens et ateliers participatifs

3.2.3.2.1. Séances d'observations des contrôleurs en contexte opérationnel

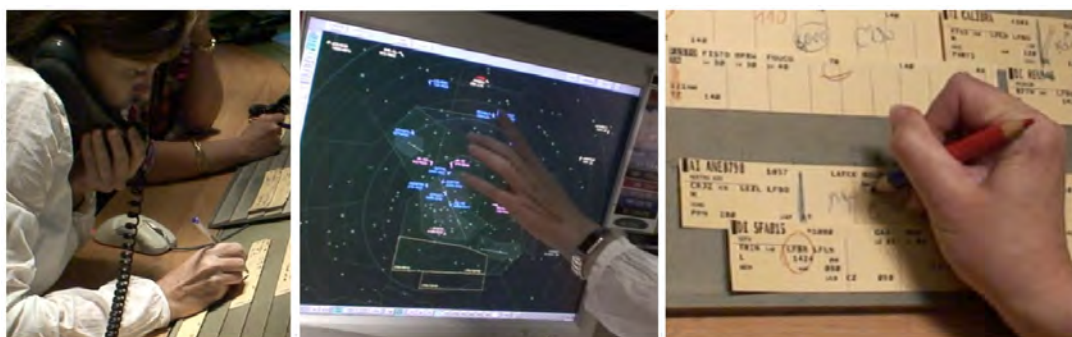


Figure 100 : Observations des contrôleurs d'approche et de tour à Blagnac

Au cours du projet, de nombreuses observations des contrôleurs aériens ont été menées pour mieux comprendre l'activité de contrôle, en en-route, en approche, en tour (vigie). Ces observations ont été réalisées dans un cadre opérationnel, contrôle en-route au centre de Contrôle Régional de la Navigation Aérienne (CRNA/SO) de Bordeaux, contrôle d'approche et de tour sur l'aérodrome de Blagnac (voir Figure 100), mais aussi dans le cadre de formations pour les contrôleurs aériens à l'ENAC.



Figure 101 : Typologie de gestes observés avec l'usage d'un tableau de strips.
 a) geste « beat » pour soutenir une description de trajectoire,
 b) saisie d'un strip de l'imprimante, c, d) bimanualité,
 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. [Gauthier 2014]

Ces observations « ethnologiques », in-situ, de l'activité des contrôleurs dans leur cadre habituel de travail ou en formation, accompagnées et commentées par des contrôleurs et complétées par des interviews ont éclairé la compréhension d'un métier fortement spécialisé, avec des contextes diversifiés et des activités complexes. La possibilité de réaliser des enregistrements vidéo, centrés sur l'action des mains, sur le tableau de strips ou sur les échanges entre contrôleurs a permis de revenir a posteriori sur ces données. Elle nous a donné la possibilité d'analyser plus finement les gestes, les interactions multiples et les collaborations entre contrôleurs réalisés à partir des strips. Une analyse plus particulière des gestes des contrôleurs a été présentée dans le cadre du forum FITG 2012 à Lille [Letondal 2012]. La Figure 101, issue de [Gauthier 2014] présente une sélection de ces gestes.

3.2.3.3. Ateliers participatifs



Figure 102 : Ateliers de conception participative (juillet 2012) :
un échange de point de vue entre contrôleurs (à gauche),
maquettage par un contrôleur du suivi de l'évolution de l'altitude du vol (à droite).

Dans le cadre du projet nous avons mené plusieurs phases itératives de conception et de prototypage participatif avec des contrôleurs aériens, notamment avec les contrôleurs d'approche de Toulouse Blagnac et de Paris Orly et avec des contrôleurs-instructeurs de l'ENAC. Des ateliers, à l'exemple de ceux de l'été 2012 présentés par la Figure 102, ont permis : de confronter les expériences ; de discuter les idées concernant l'usage possible de l'environnement tangible augmenté du prototype pour supporter l'activité ; de rédiger des scénarios de travail et de conception ; de réaliser des prototypes papier et vidéo ; d'évaluer les propositions lors de sessions de design walkthrough. Les contrôleurs ont proposé des scénarios et des prototypes sur des thèmes tels que le dégroupement, la détection des conflits, la gestion des stacks, etc.

Au cours de ces ateliers, nous avons observé les contrôleurs et discuté avec eux pour mieux comprendre les aspects importants de leur activité liée au contexte de contrôle d'approche. Nous avons aussi expérimenté de nouvelles solutions techniques et d'interaction pour le prototype Strip'TIC. Nous avons pu les tester, en faire la démonstration à des contrôleurs et obtenir une rétroaction immédiate. Nous avons aussi laissé les contrôleurs jouer librement avec le prototype pour noter leurs réactions et propositions d'idées, dans le but de réfléchir à l'évolution possible de l'activité supportée par un tel espace interactif mixte. Nous avons pu faire des démonstrations du prototype à de nombreux contrôleurs français, allemands, norvégiens, anglais, etc., de passage à l'ENAC.

3.3. Cohérence et continuité de l'espace interactif entre physique et numérique

Lors des ateliers, les contrôleurs ont souvent évoqué leur impression d'une forte cohérence de la position de travail prototype, produite par l'intégration des strips papier dans le système interactif ATC et par l'utilisation généralisée de la trame Anoto sur les diverses surfaces du dispositif. Ils ont souligné qu'ils pouvaient ainsi agir avec le même stylo, sur l'image radar, sur les strips papier et virtuels, ou sur le tableau de strips, pour des fonctionnalités équivalentes dans le système. Pour sélectionner des vols, visualiser les conflits potentiels ou modifier l'image radar (cf. Figure 103). Cette caractéristique du dispositif a souvent été exprimée comme « magique » par les contrôleurs découvrant Strip'TIC en ce sens qu'elle résulte d'actions implicites réalisées de façon « habituelle » pour eux avec les objets et outils quotidiens du contrôleur : déplacements manuels de strips papier sur le tableau, désignations et tracés réalisés au stylo sur les strips papier ou sur l'écran radar ; que ces actions habituelles ont pour effet de modifier le système, par exemple par la projection d'informations ATC supplémentaires ; tout en masquant l'aspect informatique du processus (ordinateur, système, dialogue, etc.).

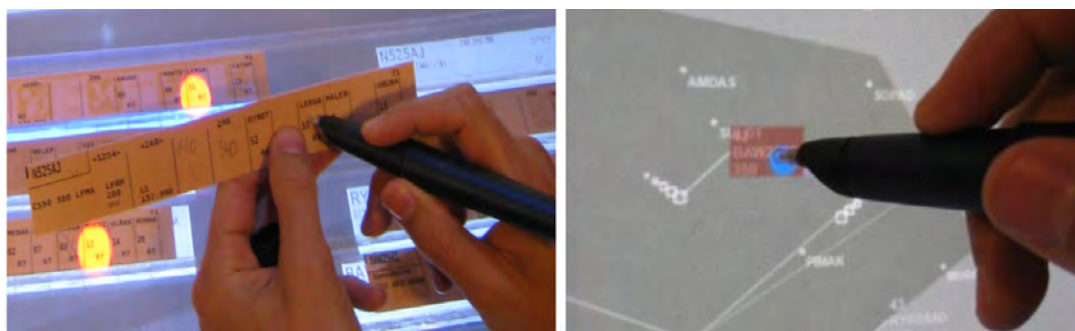


Figure 103 : Interaction généralisée avec Anoto (à gauche) filtrage initié sur un strip en dehors du tableau, (à droite) sélection au stylo sur l'écran radar

3.3.1. Cohérence de l'interaction et continuité entre surfaces

3.3.1.1. Un espace continu d'interaction multi-surfaces

Dans le prototype Strip'TIC, l'interaction avec le stylo numérique Anoto est possible sur un ensemble de surfaces couvertes par la trame DDP Anoto : écran frontal de l'image radar et écran horizontal complémentaire, surface du tableau de strips incluant les linéaires de rangement des strips et de larges bordures latérales, à gauche, à droite et en bas du tableau, mais aussi collection de surfaces « papier » de l'ensemble des strips physiques actifs sur la position, positionnés sur le tableau ou manipulés hors tableau (voir Figure 104), et surface mobile de la tablette d'interaction. La surface totale ainsi couverte par la trame DDP est d'environ 1m². Les plans fixes des écrans et du tableau, situés à distance ergonomique pour les contrôleurs en poste, « matérialisent » (bornent) un espace physique d'interaction pour la position de contrôle. Les strips papier et la tablette mobile définissent des plans d'interaction plus flexibles, « détachables » de la position de contrôle, qui pourraient être ainsi utilisés par un troisième contrôleur ou par le *chef de salle*⁸, pour

8 La salle de contrôle est supervisée par le chef de salle ou Responsable De Salle (RDS) qui prend les décisions d'armement, d'ouverture ou de fermeture des positions

préparer une instruction, annoter le strip, faire une coordination avec le secteur suivant ou contrôler le système.

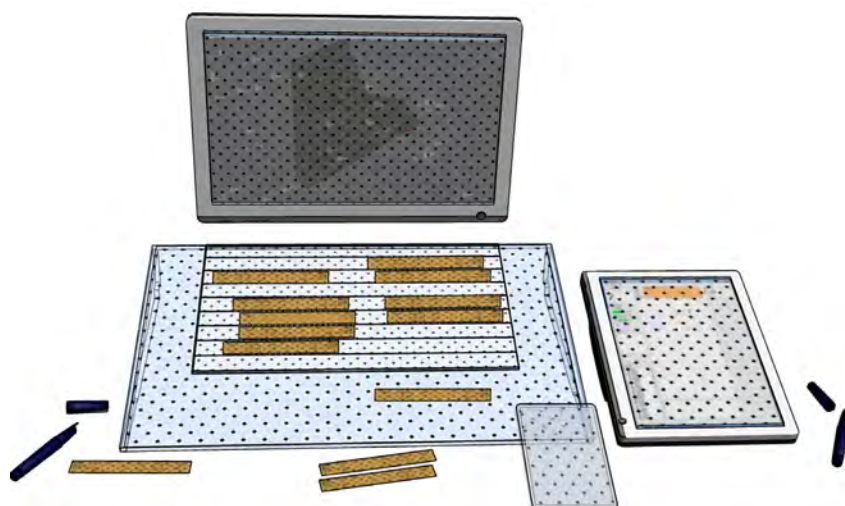


Figure 104 : Composition des surfaces du dispositif recouvertes de la trame Anoto et permettant de produire des événements avec le stylo : écrans radar et secondaire, tableau de strips, strips papier présents sur la position, tablette mobile.

Ces différentes surfaces, tramées avec des sections d'adressage spécifiques (cf. Figure 105), permettent une utilisation généralisée du stylo Anoto - lecture par la caméra embarquée du stylo et transmission Bluetooth des coordonnées Anoto de la zone survolée - et donc de produire des événements utilisables par le système. La surface composite, formée de l'addition des surfaces de chaque plan, périphérique ou objet recouvert par la trame, constitue ainsi un périphérique d'entrée « continu », de forme et de surface complexe, dont la dalle interactive est composée de multiples zones planaires disjointes, de taille et orientation diverses.

■ Événement générique, adressage et transformations spécifiques

[illegible]

Figure 105 : Utilisation des pages d'adressage Anoto. Les pages utilisées pour les écrans sont positionnées en mode paysage (landscape)

La Figure 105 présente la composition des pages d'adressage (A4) du tramage DDP Anoto utilisés dans le prototype. Par exemple, le tableau de strips est couvert par l'utilisation de sept pages d'adressage (0 à 7). Les pages 6 et 7 ont été coupées en deux et positionnées sur les marges gauche et droite du tableau afin de laisser la partie centrale de placement des strips couverte par des sections entières. Les pages centrales 0, 1 et 2 couvrant les 7 premières lignes

de strips et le haut des pages 3, 4 et 5 les 2 lignes de strips restantes plus la partie basse du tableau. Les écrans sont couverts par des pages dont la trame est imprimée en mode paysage (landscape) pour mieux s'adapter au format des périphériques. Ce choix nécessite une transformation des coordonnées incluant une rotation x y (cf. extrait de code Figure 110). Enfin, les strips papier utilisent des sections d'un dixième de page A4 d'adressage : pages Anoto 10 à 13.

Le positionnement et le déplacement d'un stylo Anoto sur n'importe quelle surface imprimée avec la trame génèrent l'envoi au système d'un nouvel événement, avec pour paramètres l'identifiant du stylo, l'identifiant de la page Anoto concernée, et les coordonnées x et y de la position stylo dans cette page. Ces événements sont traités de façon centralisée, en fonction du type de support émetteur (strip, radar, tableau...) correspondant à la catégorie d'affectation de la page, par exemple pour une section attribuée à un strip particulier. Les coordonnées Anoto sont transformées et normalisées en fonction de la surface totale couverte du périphérique ou du plan concerné, par exemple totalité de l'écran ou surface de papier d'un strip, avec des valeurs de coordonnées entre (0,0) coin haut gauche et (1,1) coin bas droit de la zone cible. Cette transformation est ensuite redirigée par l'appel d'une méthode de classe de l'objet de destination qui traite l'interaction « métier ». La section 3.3.2.3. de ce mémoire présente plus spécifiquement le concept de « Window Manager Tangible » implémenté dans Strip'TIC et détaille l'aspect logiciel et géométrique de la gestion des événements Anoto sur la position.

Enfin, la vue « locale » rendue par la classe est transformée et composée au sein d'une image globale de projection. Pour le tableau de strips, ces images de projection (basse et haute) incluent l'ensemble des vues concernées : les différents strips positionnés sur le tableau mais aussi les autres composants de l'interface (ex. widgets). Pour les strips, la composition des vues utilise les coordonnées et transformations issues du tracking des strips. Ces images globales sont elles-mêmes transformées pour s'adapter à la déformation optique produite par le vidéo projecteur et le jeu de miroirs et à la position du plan de projection dans l'espace 3D (voir l'article « *Qu'est-ce qu'une surface d'affichage?* » [Bucher IHM09]). Ces transformations successives permettent une fusion visuelle de l'image et des informations projetées sur les supports physiques : par exemple, pour que les strips papier et virtuels se superposent bien ou que les informations projetées sur le strip coïncident avec les informations imprimées.

3.3.1.2. Exemple 1: cohérence de l'interaction entre surfaces et filtrage de vols

L'homogénéité du tramage DDP sur l'ensemble des surfaces du prototype permet un usage généralisé du stylo Anoto sur les différents plans et périphériques du dispositif. L'utilisateur peut ainsi réaliser des interactions très semblables sur les différents supports.

L'interaction de « filtrage » permet au contrôleur de visualiser sur demande l'ensemble des vols passant par une balise. Cette fonction de filtrage, inspirée de la fonction développée dans DigiStrips [Mertz 2000], met en évidence sur les interfaces radar et strips les vols dont la route croise cette balise. L'interaction est initiée par un pointage maintenu (Down Event) réalisé avec le stylo Anoto sur une représentation quelconque de la balise : zone correspondante d'un strip papier, positionné sur le tableau ou hors tableau (cf. Figure 106 au centre) ou d'un strip virtuel projeté ; représentation de la balise elle-même sur l'image radar, affichée par un symbole graphique (voir Figure 106). Pendant

la durée de cet appui, des feedbacks d'information sont affichés sur l'ensemble des représentations des vols du filtrage. Sur les strips du tableau concernés par le filtrage, l'affichage d'une pastille de couleur jaune ou verte indique respectivement que le vol va croiser ou a déjà croisé la balise (cf. Figure 106 à gauche). Un vecteur graphique et une valeur textuelle de même couleur précisent la distance temporelle au croisement. Sur l'image radar, les vols ainsi que la route graphique des trajectoires sont également mis en évidence avec le même codage couleur (cf. Figure 106 à droite). Cette interaction est non modale et l'affichage disparaît au relâché du stylo par l'utilisateur.



Figure 106 : Interaction de filtrage réalisée avec le stylo Anoto : à partir d'un strip positionné sur le tableau (à gauche), avec un strip hors tableau (au centre), à partir de l'image radar (à droite).

Cette fonction/interaction peut être considérée comme « symétrique » entre le tableau de strips et l'image radar. Elle est « orientée vol » sur le tableau où le contrôleur sélectionne une balise de la route d'un vol sur un strip pour évaluer par exemple les conflits potentiels d'une modification de la trajectoire pour ce vol. Elle est « orientée balise » sur l'image radar car permettant au contrôleur de vérifier les conflits à venir concernant un point de passage (de croisement) des routes du secteur de contrôle en compte, connu des contrôleurs comme une zone « à risques ». La similitude de comportement des interfaces et l'homogénéité de l'action utilisateur sur ces deux espaces et outils différenciés de la position (en termes de technologie, de rôle, de représentation) augmentent l'impression d'un espace interactif unifié pour l'utilisateur.

3.3.1.3. Exemple 2 : continuité objet-substrat et extension du strip

Un autre avantage de cette continuité de l'interaction est qu'elle permet une nouvelle perception et de nouveaux usages, plus intégrés, des objets et des surfaces dans l'environnement du dispositif interactif. Par exemple, il est ainsi possible d'écrire au stylo non seulement sur les strips papier, mais aussi sur le plan de travail en verre du tableau de strips. Ceci permet d'étendre la représentation et les interactions réalisées avec le strip papier au substrat du tableau.

L'exemple 2 illustre la capacité offerte par le tramage Anoto généralisé de s'affranchir des limitations de l'interaction aux « frontières » des objets de l'interface. Plus précisément, l'interaction (en entrée) mais aussi la représentation (en sortie), ne s'arrêtent pas aux limites physiques du support papier du strip. Le tramage respectif des strips et du tableau de strips et le rendu augmenté par les projections lumineuses, permettent de « déborder » du papier, mais aussi de « concrétiser » une extension virtuelle et interactive du

strip papier posé sur le tableau, et d'augmenter ainsi la représentation et les interactions possibles.



Figure 107 : Interaction avec le stylo Anoto de notation utilisant un principe d'extension sur le tableau de strips du strip papier par une partie virtuelle.

La Figure 107 présente une interaction d'annotation d'un message sur une extension du strip papier. Pour initier l'interaction, le contrôleur réalise un geste horizontal au stylo sur un strip papier — tracé de l'intérieur du strip papier vers la droite et l'extérieur — qui provoque l'ouverture animée d'une extension virtuelle du strip, affichée par projection inférieure sur la surface en verre du tableau. Sur cette extension virtuelle, le contrôleur peut annoter librement le strip avec un message textuel ou un symbole (ex. un «W» de warning), ou préparer une instruction en écrivant avec le stylo Anoto une valeur de clearance. Cette annotation enregistrée sera ou non interprétée par le système, c'est-à-dire transformée à l'aide d'un moteur de reconnaissance d'écriture en saisie de données pour le système. À la fermeture de l'extension, un symbole projeté sur le strip papier indiquera l'existence d'un contenu qui sera accessible et partageable avec d'autres opérateurs par un geste d'ouverture de l'extension réalisé sur le strip.

Cet exemple d'interaction, mixant interface physique, ici strip papier et interface virtuelle, ici la projection d'une extension au strip, illustre un principe très important dans Strip'TIC de continuité de l'interface entre physique et virtuel. Le geste commencé sur le strip papier se prolonge naturellement sur la surface support (substrat) en verre du tableau de strips, et dans une même séquence temporelle par l'interaction avec l'extension graphique virtuelle, permettant une continuité d'action du stylo entre objet et substrat. Cette continuité interactive jointe à l'extension virtuelle de représentation de l'objet strip donne au support physique une plasticité nouvelle : la bande de papier peut ainsi s'étirer et se rétracter à volonté et la forme de l'objet comme les tracés et interactions réalisés avec lui, peuvent « déborder » des limites contraintes du support physique.

3.3.2. Continuité physique-numérique de l'interface : un *Window Manager tangible*

Pour les contrôleurs, le strip papier est la représentation principale d'un vol en responsabilité⁹ traversant leur secteur. Le tableau de strips regroupe et per-

⁹ Le strip papier représente le *contrat* de contrôle aérien envers un vol IFR (vol aux instruments), assumé par l'équipe de contrôleurs d'une position de contrôle en entrée et durant toute la traversée d'un secteur contrôlé. Ce strip, annoté des instructions de contrôle (clearances) données par les contrôleurs au pilote, sera conservé après la sortie de secteur du vol et archivé pour une potentielle utilisation légale ultérieure.

met d'organiser l'ensemble des strips *activés* sur la position de contrôle. Ces strips sont ainsi des « vues papier » uniques de chacun des avions contrôlés, qui regroupent les informations imprimées du plan de vol. Elles intégreront aussi toutes les données de contrôle manuscrites – instructions données aux pilotes pendant leur traversée du secteur et annotations – tracées sur le strip par les contrôleurs.

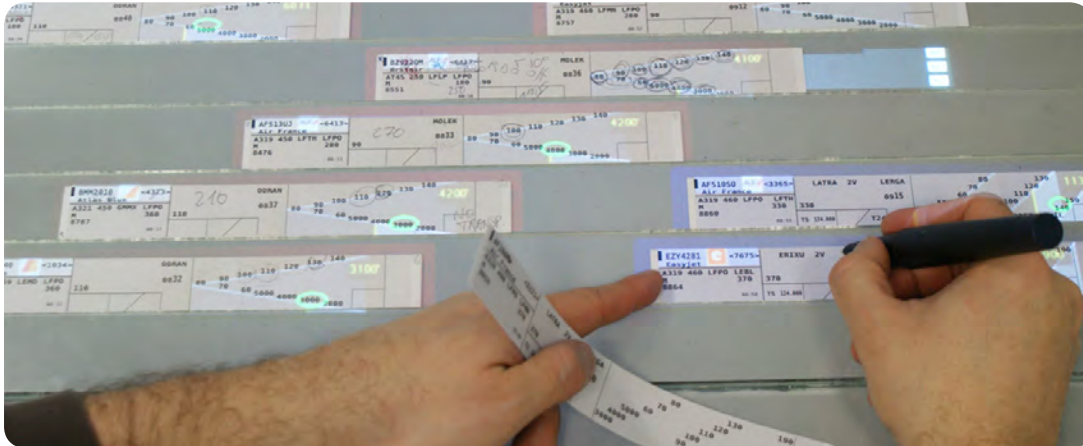


Figure 108 : Le tableau des strips de Strip'TIC, un *Window Manager* aux vues mixtes physiques et numériques contrôlées par la partie physique de l'objet

Dans Strip'TIC, les strips papier sont, de fait, des *objets physiques d'intérêt premier* pour le contrôleur. La transposition sur le dispositif de cette procédure de contrôle au strip papier, augmentée par la projection vidéo d'informations dynamiques sur les strips (cf. Figure 108), est rendue possible par le tracking de la position des strips sur le tableau. Cette fusion physique-numérique nécessite une gestion de l'interface tangible du tableau de strips, en entrée (événements) et en sortie (affichage), semblable à celle dévolue au Window Manager des interfaces graphiques basées sur la notion de fenêtres.

3.3.2.1. Un concept de Window Manager Tangible ?

Le paradigme WIMP a généralisé le concept d'une interface graphique utilisateur 2D (GUI), basée sur l'utilisation de fenêtres applicatives multiples et indépendantes. Dans ce type d'interface (desktop), le Windows Manager est principalement responsable de l'affichage graphique et de la gestion des événements (souris, clavier).

3.3.2.1.1. les fonctions du Window Manager

L'article fondateur de Myers, «*Window Interfaces, A Taxonomy of Window Manager User Interfaces*» [Myers 1988] analyse les Window Managers existants et présente une taxonomie qui a pour but d'identifier les fonctions communes, mais aussi de comparer les différentes approches. Myers identifie ainsi des caractéristiques communes à l'ensemble des Window Managers comme l'utilisation de fenêtres et du paradigme WIMP issu du concept Alto du Xerox Parc, une séparation logicielle forte de chaque processus, ou la fourniture d'une interface de haut niveau pour la gestion des entrées clavier, d'un pointeur et curseur souris et de l'affichage-écran, permettant de faciliter le portage d'applications entre systèmes.

Myers définit deux couches essentielles : une couche basique, qui implémente les fonctionnalités Window System de la partie *Program Interface* et une

couche d'interface graphique utilisateur ou *User Interface*. Dans son article, il se concentre sur la couche User Interface en l'assimilant plus spécifiquement à la notion de Window Manager. Cette interface graphique est divisée en deux composantes : la couche *Présentation* (affichage graphique) et la couche *Opération* (gestion des événements).

■ Couche présentation

L'un des aspects les plus importants de la couche présentation, et qui différencie dans l'étude les systèmes analysés, concerne les fenêtres :

- la stratégie « spatiale » d'affichage des fenêtres : superposition (*desktop metaphor*) ou tuilage ;
- l'affichage « image » de ces fenêtres par exemple la réduction iconique ;
- le rendu graphique des décorations : titre, fond, bordures ou ombre portée de la fenêtre ;
- le changement d'état graphique lié au focus.

La partie présentation fournit également une boîte à outils (Toolbox) en direction des développeurs d'application composée d'un ensemble de composants logiciels ou widgets qui seront utilisés au sein des fenêtres applicatives : menus, boutons, boîtes de dialogue, scrollbars ou mécanisme d'édition de texte. Elle implémente également des composants et outils globaux, tels que la barre d'application et de tâche du dock (Mac OS X) ou le menu *démarrer* et la barre de tâche de Windows.

Le rendu visuel de cette architecture graphique dérive de l'application d'un style graphique particulier *Imaging Model* fourni par le *Graphic Package*, qui permet de garantir l'homogénéité visuelle de l'interface. Certains styles sont remarquables, comme l'interface graphique du NeXT (cf. Figure 109 à gauche) utilisant le langage Display Postscript développé avec Adobe pour mieux structurer l'affichage graphique et corréliser affichage et impression des documents, ou l'interface *Aqua* des systèmes Mac OS X d'Apple (cf. Figure 109 à droite), permettant des rendus graphiques particulièrement esthétiques qui a fortement contribué aux succès des appareils Apple.



Figure 109 : Window Manager et interface graphique : OS NeXTSTEP de NeXT Computer (à gauche) et Mac OS X d'Apple (à droite).

■ Couche Opération

La couche opération concerne les aspects non graphiques du système, notamment la gestion des périphériques d'entrée clavier et souris et les raccourcis

de commande, la position du pointeur et la gestion du focus, le traitement et la distribution des événements.

Cette couche opération assure aussi la gestion de la structure graphique des fenêtres : leur création ou leur destruction (collection), leur état d'affichage, iconique-fenêtré-plein écran, et la transition entre ces états, leur manipulation, déplacement, modification de taille, ordonnancement en Z sur la pile d'affichage ; et la gestion du rafraîchissement du rendu graphique des fenêtres. Elle gère également la réservation de zones écran (par exemple la zone inférieure du bureau Windows réservée pour la barre de tâches), le basculement entre bureaux virtuels, l'affichage de menus *pop-up* de contrôle ou d'ouverture d'applications, ou encore l'affichage d'arrière-plan ou le mécanisme d'écran de veille.

Elle fournit enfin des mécanismes et services transversaux entre applications tel le mécanisme de copier-coller ou de glisser-déposer (drag-and-drop) entre applications.

3.3.2.1.2. Étendre le concept de Window Manager au tangible

Plusieurs travaux récents proposent d'« interroger » le concept d'une interface de type desktop appliquée à des surfaces non rectangulaires, de type 3D, surfaces composites ou irrégulières, ou même à des environnements physiques. [Waldner 2011] présente des techniques d'affichage pour une interface utilisant des surfaces de projection irrégulières, et les résultats d'une étude exploratoire des aspects Window Manager d'une telle interface. ARWin [DiVerdi 2003] propose un environnement de bureau de type Réalité Augmentée dont le gestionnaire d'événements utilise la capture vidéo de patterns AR (ARToolkit) placés sur des objets physiques et un gestionnaire d'affichage permettant d'afficher par projection les textures 3D de fenêtres d'applications X Windows.

Le prototype Strip'TIC intègre une gestion de l'interface mixte (associant objets physiques et virtuels) d'un tableau de strips qui implémente les deux fonctions principales d'un Window Manager : Une gestion de l'affichage graphique de l'interface, basée sur la composition et l'affichage de multiples vues en sortie (les strips), et une fonction de gestion centralisée et de redistribution des événements en entrée. En ce sens pouvons-nous dire que Strip'TIC implémente un concept de Windows Manager Tangible ?

3.3.2.2. Fenêtres numériques en papier et gestion des vues

Dans Strip'TIC, le tracking vidéo des strips papier permet à l'utilisateur de créer de nouvelles « vues-strip » corrélées aux strips physiques placés sur le tableau de strips, de les repositionner en déplaçant les strips physiques ou de les « détruire » en les ôtant du tableau. Ce tracking permet au système de gérer une liste de ces « vues-strip », d'incorporer de nouveaux strips à la liste ou d'en supprimer si besoin, et de connaître la position (coordonnées) et la géométrie de l'ensemble des strips présents sur l'interface du tableau de strips. Le maintien de cette liste de composants strip permet d'afficher par projection sur le strip des « décorations », couleur de fond, saillance identitaire et des contenus augmentés. Il permet surtout de créer un double numérique de la vue, le strip virtuel, à l'emplacement exact du strip papier correspondant. Ce strip virtuel peut être maintenu en l'absence du strip physique ou même créé si besoin sur la position pour un vol *non en compte* (dont le strip papier

n'a pas été imprimé). Le positionnement et le déplacement des strips sur le tableau, mais aussi la sélection, provoquent une mise à jour dans le système et permettent la composition géométrique de l'affichage des projections vidéo haute (données augmentées) et basse (strips virtuels). Cette composition de l'affichage correspond à celle de vues ou *fenêtres*, mais qui mêle ici support papier, traces physiques et projections lumineuses, et permet de construire des représentations de type strip augmenté des vols.

Ce strip augmenté constitue un nouveau type de composant « *container* », mi-physique, mi-numérique : une « *fenêtre numérique en papier* ». Un container mixte, qui intègre à la fois l'affichage imprimé de la structure de données des informations plan de vol, mais qui aussi contraint spatialement l'affichage des informations lumineuses dynamiques, issues des interactions de l'utilisateur comme la saisie d'instructions ou les annotations, ou des données transmises par le système, paramètres avion descendant du vol ou informations ATC de trafic, météo...

Cet usage et ce rôle de container des strips physiques augmentés sont assez symétriques de ceux des fenêtres dans le GUI. Néanmoins, il faut souligner que la gestion de ces « *fenêtres numériques en papier* » est ici totalement transparente pour l'utilisateur, puisque le contrôleur organise ses strips augmentés sur son tableau comme il le ferait avec des strips papier classiques, et d'une façon très performante grâce à l'aspect « *graspable* » (saisissable, perceptible, compréhensible) du papier, et à l'usage libre des deux mains. De plus, ces « *fenêtres-strip* » sont moins cloisonnées que les fenêtres du GUI. Par exemple parce qu'elles permettent de réaliser aisément des groupements, liens ou interactions entre strips et qu'elles sont utilisées de manière cohérente (coopérative) pour organiser le trafic et programmer l'activité. Contrairement aux fenêtres numériques des GUI, elles sont principalement utilisées en mode *tuilage*, juxtaposées plutôt que superposées, même si cette superposition est possible. De plus, et c'est un avantage sur le Windows Manager du GUI, le contrôleur prendre ces « *fenêtres-strip* » avec lui (dans sa main) et s'éloigner du tableau : le strip et ses interactions Anoto (pointage, filtrage...) continue de marcher. Le fait de redéposer le strip sur le tableau le repositionnera dans la liste du tableau et réactivera les formes numériques de la représentation.

3.3.2.3. *Gestion des événements et transformation des coordonnées des objets physiques*

La Figure 110 présente des extraits du code logiciel C# traitant les événements. Le tramage Anoto généralisé sur les surfaces physiques du dispositif et notamment sur le tableau de strips et sur les strips papier, permet de générer des événements de type curseur qui sont analysés par le système. Ces événements sont transformés dans l'espace de coordonnées cible, par exemple celui d'un strip, puis renvoyés sous la forme de messages Ivy aux instances logicielles des vues-fenêtres concernées, comme le ferait un WM classique, pour déclencher des actions logicielles.

Le positionnement et le déplacement d'un stylo Anoto sur une surface imprimée avec la trame DDP génèrent l'envoi au système d'un nouvel événement `PenManager.NewCoordinate`, avec 4 paramètres : l'identifiant du stylo (PenSerial), l'identifiant de la page Anoto concernée (ex. « 1728.0.0.14 »), et les coordonnées Anoto *x* et *y* de la position stylo au sein de cette page. Ces événements sont traités en fonction du type de support émetteur (ici strip et

tableau...) correspondant à la catégorie de la page passée en paramètre. Par exemple, pour un strip, la méthode `AnotoStrip.GetStripArea` renvoie la cellule du strip impliquée par l'input et produit un événement abstrait pour une machine à état dédiée.

```
public void SendIvyMsgPenMove(string penSerial, int x, int y, string page, IvyBus.IvyControl TheIvyBus)
{
    if ((LastX != x) || (LastY != y) || (LastPage != page))
    {
        PointF ptN = GetNormalizedCoordinate(x, y, page);

        //Normalize the data
        TheIvyBus.SendMessage("AnotoStripBoardPenDown PenId=" + penSerial + " X=" + ptN.X.ToString(c1)
                               + " Y=" + ptN.Y.ToString(c1));

        if (isMouseEmulated)
            AnotoMouse.MouseMove((int)(StripBoardTopX + StripBoardWidth * ptN.X),
                                  (int)(StripBoardLeftY + StripBoardHeight * ptN.Y));

        LastX = x;
        LastY = y;
        LastPage = page;
    }
}

public PointF GetNormalizedCoordinate(int x, int y, string page)
{
    float xn = 0;
    float yn = 0;

    switch (page)
    {
        case "1728.0.0.14": //landscape mode
            xn = Data.MathTools.GenericScaleF(y, 0, 1.0f / 4.0f, AnotoHotArea.MaxY / 2.0f, 0);
            yn = Data.MathTools.GenericScaleF(x, 0, 0, AnotoHotArea.MaxX, 1.0f / 2.0f);
            break;
        case "1728.0.0.15": //landscape mode
            xn = Data.MathTools.GenericScaleF(y, 0, 1.0f / 4.0f, AnotoHotArea.MaxY / 2.0f, 0);
            yn = Data.MathTools.GenericScaleF(x, 0, 0.5f, AnotoHotArea.MaxX, 1.0f / 2.0f + 0.5f);
            break;
        case "1728.0.0.17": //landscape mode
            xn = Data.MathTools.GenericScaleF(y, AnotoHotArea.MaxY, 1.0f / 4.0f, 0, 3.0f / 4.0f);
            yn = Data.MathTools.GenericScaleF(x, 0, 0.5f, AnotoHotArea.MaxX, 1.0f);
            break;
        default:
            break;
    }

    return new PointF(xn, yn);
}

static public float GenericScaleF(float input, float i1, float o1, float i2, float o2)
{
    if (i2 == i1) return ((o2 + o1) / 2.0f);
    float a = (o2 - o1) / (i2 - i1);
    float b = o1 - a * i1;
    return (a * input + b);
}
```

Figure 110 : Un extrait de méthodes C# dans Strip'TIC permettant l'envoi d'un message sur le bus Ivy pour traiter les événements du stylo Anoto : génération d'un message Ivy *IvyStripBoardPenMove* (en haut) qui utilise une méthode de transformation des coordonnées *GetNormalizedCoordinate* (au centre), utilisant elle-même la méthode *GenericScaleF* de la librairie DATA.MathTools (en bas)

Les coordonnées elles-mêmes, fournies par l'événement Anoto sont transformées par Strip'TIC pour correspondre aux coordonnées locales des différents plans du dispositif. La méthode `SendIvyMsgPenMove` (Figure 110 en haut), génère un message Ivy, `AnotoStripBoardPenMove` qui répond à un événement *move* du stylo sur le tableau de strips, à l'intention des clients Ivy abonnés avec des coordonnées transformées pour le tableau de strips. Cette transformation est réalisée en fonction de la source d'interaction (selon l'affectation de la page concernée qui correspond à une zone du tableau), par la méthode `GetNormalizedCoordinate`. Cette méthode retourne une position normalisée entre (0.0,0.0) et (1.0,1.0) pour la surface concernée. Pour les pages couvrant les écrans (image radar + écran latéral) l'impression en mode paysage de la trame implique une rotation des coordonnées. La Figure 110 (au centre) présente un extrait des options *case* du *switch* pour des pages en mode paysage (landscape). Enfin, la méthode `Data.MathTools.GenericScaleF` (Figure 110 en bas) calcule les coordonnées *xn* et *yn* en fonction des paramètres respectifs d'input *y* et *x* et de valeurs *MaxY* et *MaxX* de la zone de référence Anoto.

3.3.2.4. Rendu graphique sur l'interface physique et continuité « plastique » de l'interface

Dans Strip'TIC, les couches numériques du rendu graphique sont affichées par projection sur les plans et objets physiques de l'interface. Elles incluent les strips virtuels, les données augmentées projetées sur le strip papier ou l'affichage graphique de feedforwards et de feedbacks répondant aux interactions. Elles incluent aussi les effets de « *décorations graphiques* » des vues, par exemple un rectangle de couleur modifiant la teinte du strip papier, un contour de type « porte-strip » et des informations identitaires, par exemple un renforcement du callsign (identifiant de l'avion) ou le logo de la compagnie aérienne. Ce rendu graphique de l'interface, d'une façon similaire à celui produit par la couche présentation d'un Window Manager 2D, compose visuellement « les fenêtres » des différents strips de la liste active du tableau, avec les informations géométriques de coordonnées, de taille et de transformation. L'interface graphique inclut également des widgets systèmes de type menu ou boutons de contrôle, affichés sur les parties latérales du tableau. Cette image globale (écran) de rendu sera finalement transformée pour s'adapter aux caractéristiques optiques des deux projections (inférieure et supérieure).

L'ensemble de ces caractéristiques de l'interface « plastique », à la fois physique et numérique, de présentation et de gestion des événements du tableau de strips correspond bien selon nous à un concept de Windows Manager tangible, permettant la gestion d'un nouveau type de composant : des « fenêtres numériques en papier ». (Cette fusion des représentations physique et numérique sera traitée en 3.4.1). Ce principe d'interface « plastique » engendre une forte cohérence et continuité entre le système d'information ATC et les objets physiques de représentation et d'interaction. Le terme d'interface « plastique » retenu ici renvoie à l'Art et aux créations artistiques physiques (de surface ou volumique) et picturales qui peuvent aussi intégrer des projections lumineuses. Cette interface présente une continuité perceptuelle évidente entre physique et numérique.

Les aspects interactifs de cette continuité sont également très importants. Nous les développons dans la section suivante.

3.3.3. Interactions continues entre physique et numérique

3.3.3.1. Exemple 3 : continuité d'usage entre strip papier et strip virtuel

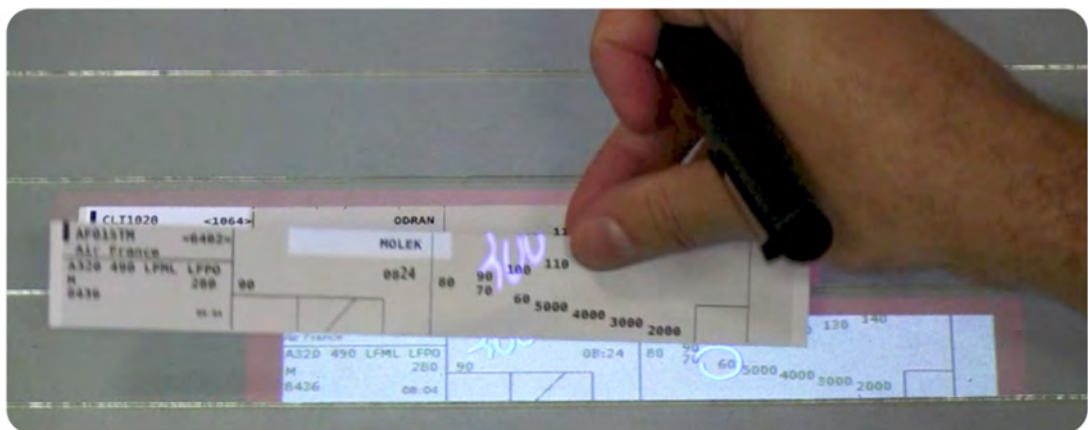


Figure 111 : Strip physique papier et strip virtuel

La Figure 111 présente un strip papier et son double virtuel : le strip papier est ici soulevé par le contrôleur en vue d'un déplacement et révèle le strip virtuel associé, projeté en dessous du strip par le vidéo projecteur situé sous le tableau de strips. On peut discerner sur l'image l'information projetée d'une instruction de vitesse de 300 Kt¹⁰, saisie manuellement sur le strip par le contrôleur, et projetée à la fois par-dessous sur le strip virtuel et par-dessus, apparaissant comme un tracé lumineux sur le strip papier soulevé.

Dans Strip'TIC, le strip virtuel est une instance numérique dupliquant le strip papier, et représentant comme lui un vol en responsabilité sur le secteur de contrôle. Il reproduit l'ensemble des informations portées sur le strip papier : informations imprimées par l'imprimante à strips lors de la création du strip sur la position ; informations de contrôle ou annotations écrites avec le stylo Anoto par le contrôleur sur le strip ; informations complémentaires ou feedbacks projetés par le système. Enfin, le strip virtuel peut être présent sur le tableau de strips indépendamment du strip physique, par exemple en cas de maintien suite à une procédure de dégroupement du vol¹¹ ou de transfert¹² vers une autre position, ou par la création d'un strip virtuel pour un vol non en compte.

Le rôle du strip dans l'activité est central et les interactions du contrôleur avec les strips du tableau sont nombreuses (cf. 3.2.2). Dans Strip'TIC de nombreuses interactions sont possibles sur et avec les strips physiques et virtuels. Ces interactions concernent cinq classes d'usage : l'organisation du tableau de strip, la recherche d'informations, la saisie d'instructions, la communication et l'exploration de solutions.

L'organisation du tableau est essentielle pour appréhender le trafic et planifier efficacement l'activité. Elle consiste principalement à positionner les strips et à les déplacer sur le tableau pour les organiser en flux évolutifs de vols. L'interaction avec le strip papier, par exemple un déplacement par glissement du strip avec le doigt, contrôle le déplacement conjoint du strip virtuel. De la même façon, un strip virtuel isolé (séparé de son strip physique) pourra être déplacé par glissement avec le doigt ou le stylo sur le tableau de strips.

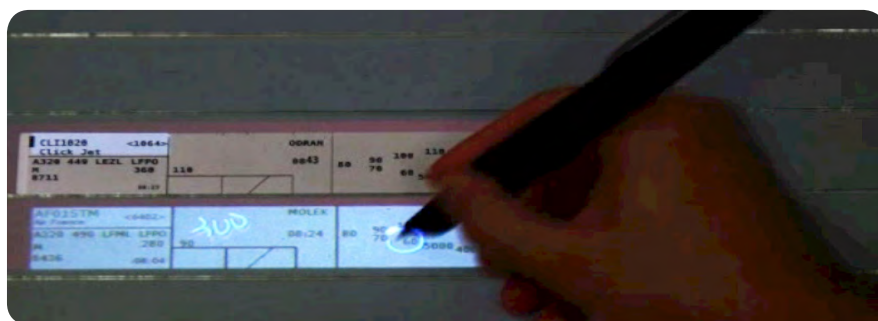


Figure 112 : Saisie d'une clearance d'autorisation de niveau sur un strip virtuel

- 10 Le nœud (noté Kt) est une unité de vitesse utilisée en navigation aérienne. Un nœud correspond à un mille marin par heure, soit 1,852 km·h ou 0,514 m·s.
- 11 Le dégroupement des vols est une procédure permettant de diviser en deux un secteur de contrôle en cas de trop forte charge du trafic. Une deuxième position est créée avec deux contrôleurs supplémentaire pour gérer une partie de l'espace et les strips des vols sont répartis entre les deux positions. Il est intéressant dans ce cas de maintenir temporairement les informations sur les deux positions.
- 12 Le transfert de vol entre positions successives correspond au passage de responsabilité entre deux secteurs de contrôle. Ici aussi, le maintien d'un strip virtuel sur la position "donnante" est utile.

L'ensemble des interactions possibles avec le stylo Anoto sur le strip est réalisable indifféremment sur le support physique du strip papier ou numérique du strip virtuel (par l'intermédiaire du support interactif du tableau). La recherche d'information, par exemple la désignation du vol sur le radar à partir d'un appui sur le strip avec le stylo ou l'interaction de filtrage (cf. 3.3.1.2) est identique sur le strip papier ou avec le strip virtuel. De même, la saisie d'une instruction correspond à une même interaction réalisée au stylo Anoto sur le strip physique ou virtuel. La Figure 112 montre la saisie d'une instruction (clearance) d'autorisation d'un niveau de vol par un « entourage » de la valeur cible sur un strip virtuel. L'écriture manuscrite avec le stylo d'une valeur numérique, sur le strip papier ou virtuel est reconnue et enregistrée par les mêmes méthodes logicielles du système. Enfin, l'écriture libre sur une extension virtuelle du strip (telle que présentée en 3.3.1.3 et par la Figure 107) ou la réouverture de la zone d'extension est déclenchée à partir d'un même geste latéral effectué indifféremment à partir d'un strip papier ou d'un strip virtuel.

Ces interactions génériques, mais également l'affichage des feedbacks ou des informations résultantes sur le strip sont totalement homogènes pour les deux supports physiques et numériques. En effet, l'affichage des informations « augmentées » réalisé par les deux projections lumineuses (haute et basse) sera identique, que le strip papier (et donc son double numérique) soit présent ou que seul le strip virtuel existe. La seule différence est que la présence du support physique, opaque, du strip papier « intercepte » l'impression lumineuse supérieure et masque en partie l'impression inférieure du strip virtuel. (Voir à ce sujet la section 3.4.1 détaillant cette impression mixte des strips). En cas d'affichage du seul strip virtuel sur le tableau de strips, le remplacement du strip papier sur le tableau provoque un recalage de la position du strip virtuel et l'affichage sur le strip papier des informations projetées, même si ces informations sont issues d'interactions réalisées avec le seul strip virtuel.

3.3.3.2. Exemple 4 : calcul tangible des heures de sortie de stacks



Figure 113 : Le calcul tangible d'une séquence d'heures de sortie (HAP) de stacks

La fonctionnalité de calcul des heures de sortie de stacks pour les avions à l'arrivée sur un aéroport est un exemple très représentatif de la continuité d'interaction entre physique et numérique dans StripTIC.

La Figure 113 présente une préparation, réalisée par le contrôleur organique, d'une séquence de sortie de stacks. Ici, deux stacks, ODRAN à gauche et MOLEK à droite permettent de mettre en attente les vols à l'atterrissage sur la plateforme aéroportuaire de Paris-Orly (LFPO). Le temps de vol entre ces stacks et la piste est différent, de vingt minutes à partir d'ODRAN et de dix minutes seulement à partir de MOLEK. De plus la sortie du stack nécessite que l'avion arrive à un point précis de sa trajectoire circulaire dans le stack. Il est ainsi difficile au contrôleur de calculer très précisément les heures respectives de sortie du stack (HAP) d'un ensemble d'avions permettant de réaliser une séquence régulière d'arrivée sur la piste (par exemple toutes les deux minutes).

Dans Strip'TIC, le contrôleur peut utiliser ses strips papier pour explorer et calculer précisément cette séquence. Par un simple appui (main ou stylo) sur un widget de contrôle présent sur l'interface, le contrôleur active la fonction de calcul. Le système « matérialise » les deux stacks définis pour la position de contrôle sur les côtés du tableau, ici à gauche ODRAN, et à droite MOLEK, avec l'affichage des niveaux de vols du stack (ex. pour ODRAN 150, 140, 130, 120 et 110). Le contrôleur positionne les strips des vols sur ces espaces et associe niveaux et vols par un appui successif, ou par une interaction bi-manuelle, du strip à l'objet « niveau », provoquant l'affichage d'un feedback de connexion vol-niveau.

À partir de cette affectation initiale, le contrôleur peut explorer et générer une séquence. Il prend le strip du vol qu'il décide devoir atterrir en premier sur la piste et le pose en bas de son tableau. Le système calcule l'heure minimale de sortie du stack (HAP) pour l'avion et l'heure d'atterrissage prévue (ici 08:32). Il affiche ces valeurs sur le strip, ainsi qu'une règle temporelle sur le côté gauche de ce premier strip avec l'heure d'atterrissage prévue et une échelle de valeurs temporelle espacée de deux minutes, 08:34, 08:36, 08:38 (affichage en bleu sur la Figure 113). Il choisit ensuite les vols de la séquence, indépendamment sur les deux stacks, pour les positionner au-dessus de ce premier vol. Le système calcule de même les heures de sortie du stack correspondantes aux heures prévues du séquençement d'atterrissage. Les connexions entre strips et niveaux s'adaptent à la nouvelle géométrie. Une simple permutation des strips de la séquence, par exemple entre les deux premiers vols, génère un nouveau calcul et un nouvel affichage de l'ensemble des heures de la séquence. Une erreur de séquence, par exemple une inversion de priorité des vols d'un stack génère un feedback d'erreur.

Cette procédure est un bon exemple de répartition et de coopération entre les deux composantes physique et numérique du système interactif. Du côté physique, la manipulation des strips papier est performante, l'insertion ou l'inversion de deux strips pouvant être fait avec les deux mains, et l'utilisation de l'espace physique est importante pour structurer l'action (cf. 3.4.2). Côté numérique, le calcul dynamique par le système du séquençement des arrivées et des HAP utilise les capacités computationnelles du système et réduit la charge mentale des opérateurs.

Comme pour le concept de Window Manager tangible où les vues sont contrôlées naturellement à la main avec les strips papier (cf. 3.3.2.2), le couplage entre arrangement physique et calcul numérique de la séquence utilise les meilleures propriétés des deux mondes.

3.4. Continuité perceptuelle et cognitive, continuité temporelle et programmation de l'action

Après cette discussion autour de la continuité de l'espace interactif et des interactions entre physique et numérique, nous pouvons poursuivre plus avant l'exploration conceptuelle de la continuité des interfaces graphiques au travers de deux aspects perceptuel et cognitif de ce travail de recherche : une problématique de continuité perceptuelle de l'interface tangible supportée par la création de représentations visuelles associant des impressions composites physiques et lumineuses ; une problématique de continuité temporelle instrumentée par le tableau des strips augmentés et permettant l'externalisation cognitive et la programmation de l'action.

Ces continuités s'inscrivent dans la théorie de la *cognition distribuée* discutée en 1994 par Zhang et Norman dans leur article « Representations in Distributed Cognitive Tasks » [Zhang 1994]. Les auteurs montrent que les deux composantes, représentations internes et représentations externes (externalisées), du système de représentation sont indispensables pour supporter les tâches cognitives distribuées. Cette théorie sera reprise 6 ans plus tard par Hollan, Hutchins et Kirsk [Hollan 2000] pour la proposer comme nouveau fondement pour la recherche en Interaction Homme-Machine.

La démonstration de Zhang et Norman du caractère distribué de la représentation des informations (interaction entre représentations internes et externes) et de la nature des représentations externes permet de mieux penser la nature des représentations externes dans Strip'TIC. Elle donne un cadre pour la conception de nouvelles représentations perceptuelles mixtes, physiques et numériques, dans le but de mieux supporter les externalisations cognitives des contrôleurs aériens et leur activité. Ces représentations externalisées seront réalisées, « matérialisées », à la fois par les objets physiques du contrôle, les strips sur le tableau de strips, mais aussi par l'ensemble des impressions — carbone, écritures, marques, projections lumineuses — portées sur ces strips. Ces représentations externes composites seront donc constituées par une superposition, ou plutôt par une fusion visuelle pour l'utilisateur, de ces différentes couches d'impression. Le contrôleur pouvant néanmoins mentalement appréhender l'origine, la nature spécifique et le « comportement » (par exemple la non-permanence des projections lumineuses) de chacune de ces couches (imprimante, stylo, vidéo projection).

3.4.1. Continuité perceptuelle des composants de représentations : substrat et impressions physiques et lumineuses du strip

La problématique de « continuité perceptuelle » réfère aux champs de la Psychologie de la perception et du Design. La psychologie de la perception pour comprendre les mécanismes perceptifs permettant des lectures à différents niveaux d'une image visuelle composite. Le Design pour analyser plastiquement les propriétés de « matériau » et d'« impression » des objets visuels de l'interface.

Nous présentons tout d'abord la construction visuelle dans Strip'TIC d'objets plastiques de représentation, les strips, associant support physique et impressions multicouches matérielles et lumineuses.

3.4.1.1. Une impression mixte multicouches

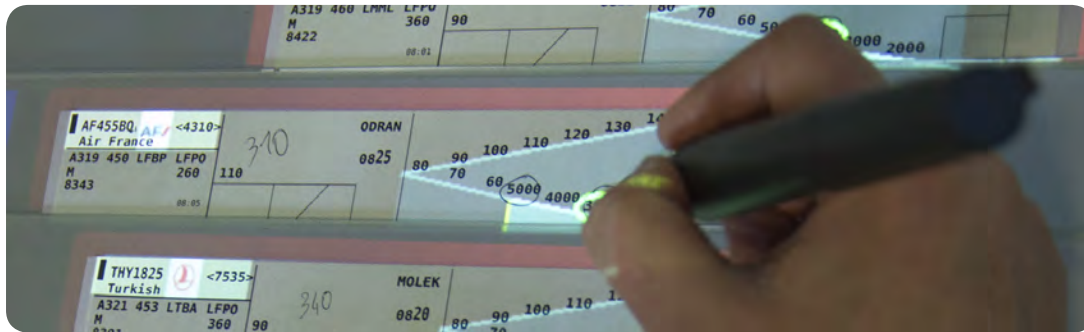


Figure 114 : Un strip tangible « AF455BQ » associant strip papier, impression carbone des informations plan de vol, saisies manuscrites à l'encre du contrôleur, projection inférieure du porte-strip et informations augmentées projetées sur le strip

La Figure 114 présente un strip papier positionné sur le tableau de strip. Ce strip intègre visuellement de nombreuses informations « imprimées » mêlant traces matérielles imprimées avec un toner carbone par l'imprimante à strip, traces encrées déposées par la pointe physique du stylo Anoto, et traces lumineuses projetées par-dessous et par-dessus le strip. Les projections lumineuses par-dessous le strip affichent, par exemple, le rectangle de couleur débordant le strip (à l'image d'un porte-strip) et qui correspond au flux de trafic, ou l'extension virtuelle du strip. Les projections supérieures affichent les données augmentées issues du système ATC, par exemple : une coloration globale du papier (correspondant à une catégorie de strips), la mise en évidence d'informations sur le strip (ex. saillance de la zone identitaire), ainsi que l'affichage de feedbacks des saisies utilisateur (de sélection, de filtrage ou concernant l'évolution de la trajectoire du vol).

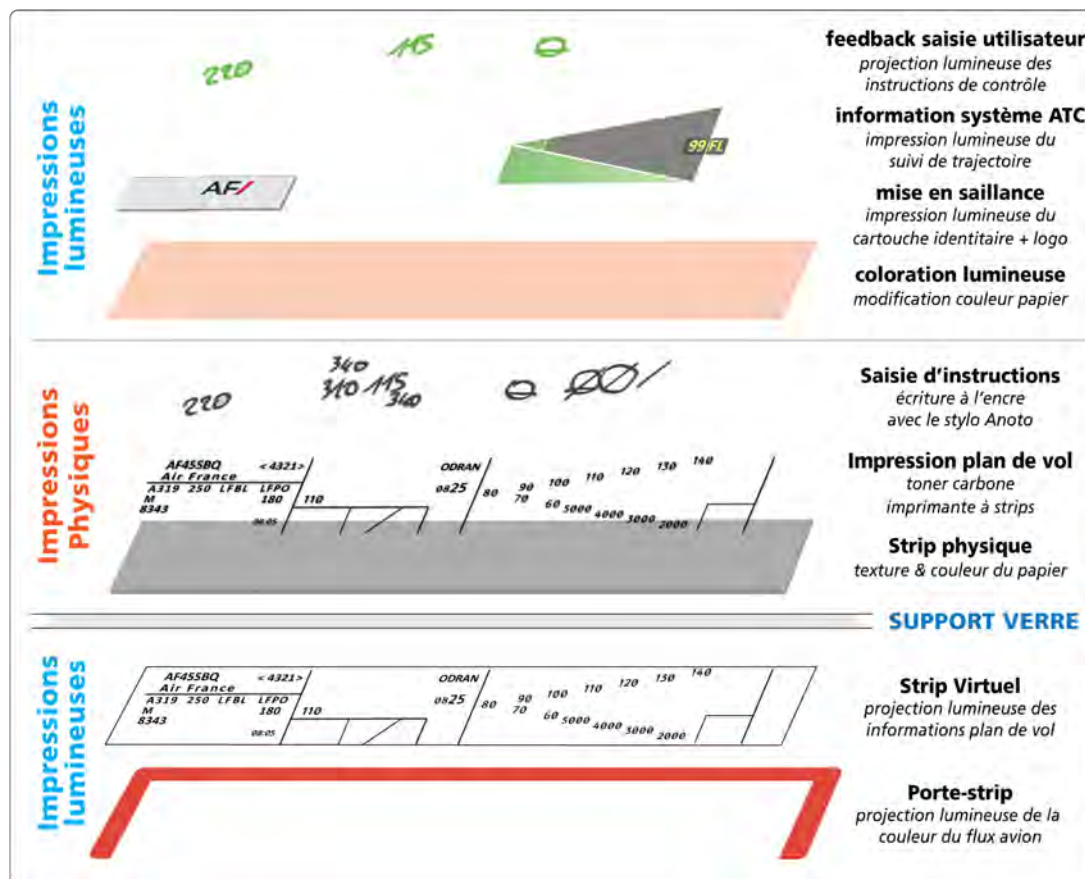


Figure 115 : Éclaté de principe des couches d'impression physiques et lumineuses du strip pour le vol « AF455BQ ».

La Figure 115 présente un « éclaté » de ces différentes couches d'impression. Les impressions lumineuses du strip virtuel et du porte-strip (Figure 115 en bas), sont projetées par-dessous le tableau sur le support en verre. Un film translucide collé sur la surface, utilisé pour réfléchir les infrarouges, permet de diffuser localement la lumière sur le verre. Posé sur le tableau, le support papier du strip regroupe un ensemble de couches et traces physiques : texture et couleur du papier lui-même, impressions au toner du plan de vol de l'imprimante à strip, et écritures à l'encre des contrôleurs réalisés avec le stylo Anoto (Figure 115 au centre). Enfin, sont projetées par le haut sur le support physique un ensemble d'impressions lumineuses superposées (Figure 115 en haut). Soit, de bas en haut :

- une coloration du fond de strip, rouge-orangée, bleue ou violette, corrélée au porte-strip et correspondant à la catégorie du vol : vol à l'arrivée, vol au départ ou vol *transversier*
- une mise en saillance de l'identité du vol avec une mise au blanc de la zone callsign et un affichage optionnel du logo de la compagnie, ici «Air France» (cf. Figure 114 en haut à gauche).
- un feedback des clearances (instructions de contrôle) actives, affichant les tracés numériques enregistrés du stylo Anoto, valeurs numériques, sélections de valeurs par entourage ou traits de soulignement ou biffures, codés avec une couleur symbolisant l'état d'alarme - vert = Ok ou rouge = alarme.
- un feedback de l'évolution verticale de l'avion, affichant dynamiquement une représentation symbolique de la trajectoire verticale sur la zone de niveaux du strip. Ce schéma de représentation intègre la valeur numérique du niveau de vol actuel ainsi que le tracé de surfaces colorées (niveau de gris) représentant l'aire triangulaire de cette trajectoire découpée en deux zones distinctes, la trajectoire réalisée et la trajectoire restant à réaliser.

La fusion perceptuelle et la permanence visuelle des couches d'impression sont fortement dépendantes du rôle de ces affichages dans le dispositif et de l'implémentation logicielle, mais aussi des propriétés des matériaux physiques et lumineux utilisés.

3.4.1.2. Continuité visuelle et dimensions perceptuelles des matériaux et des impressions

3.4.1.2.1. Continuité perceptive

La perception visuelle globale par le contrôleur de l'objet d'interface qu'est le strip augmenté, agrège au strip papier l'ensemble des traces physiques ou lumineuses, portées par le support ou accolées à lui (porte-strip), qui seront « attachées » et se déplaceront avec lui. Le déplacement numérique des traces projetées, synchrone avec le déplacement physique du strip papier indique à l'utilisateur que ces traces « appartiennent » bien à l'objet strip physique. Cette association est perçue et « comprise » par le contrôleur qui peut mentalement identifier l'origine et la nature de ces superpositions, notamment par le fait que les traces disparaissent lorsqu'il retire le strip du tableau. De même la connaissance préalable des techniques de projection conforte, pour le contrôleur, la compréhension des déformations progressives des projections hautes lorsqu'il soulève le strip du tableau. Cette compréhension physique du comportement des objets matériels et lumineux, liée au mélange visuel des

sensations colorées et des images globales produites sur les supports augmentent la continuité perceptuelle et d'usage des objets tangibles augmentés.

3.4.1.2.2. Modalités de mélange optique réel-virtuel

Dans leur livre « Spatial augmented reality » [Bimber 2005], Bimber et Raskar présentent une étude des techniques et implémentations de réalité augmentée spatiale (SAR) utilisant des affichages optiques ou de vidéo projection temps réel. Le livre décrit entre autres des techniques permettant de combiner optiquement environnement réel et virtuel, ou basées sur la projection et permettant d'augmenter des surfaces tangibles d'affichage aux géométries complexes. Ces techniques permettent de créer des visuels mixtes consistants, par exemple en termes d'occultation, mêlant perceptivement les modèles d'illumination du monde physique et des projections lumineuses ; par exemple, dans le but de modifier l'apparence de surfaces matérielles par la projection d'images virtuelles. Dans IllumiRoom [Jones 2013], les auteurs explorent comment la projection périphérique de contenus graphiques (*peripheral projected illusions*) peut annuler, étendre ou augmenter l'environnement physique.

Dans Strip'TIC la superposition des différentes couches d'impression physiques et virtuelles produit globalement deux modalités d'agrégation visuelle :

- Une **fusion** ou mélange optique visuellement « non séparable » qui modifie l'apparence d'un objet perceptuel préexistant. Par exemple la recoloration logicielle du strip physique (papier) avec des sensations différenciées de couleur.
- une **surimpression** visuelle d'éléments perceptivement différenciables par le contrôleur, par exemple la projection de données dynamiques ATC, perçues comme affichées (fixées) sur le support papier mais aussi perceptivement séparables du strip papier.

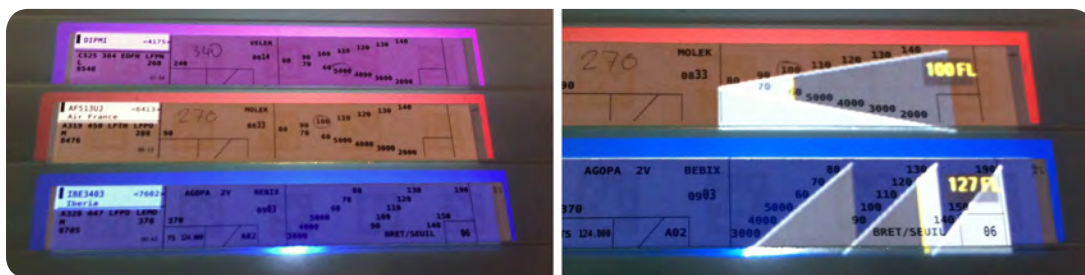


Figure 116 : Modalités de mélange perceptif réel-virtuel dans Strip'TIC, fusion optique de recoloration du strip et projection du porte-strip (à gauche), surimpression de la trajectoire verticale de l'avion sur la zone niveaux du strip (à droite).

La *fusion optique* concerne plus particulièrement une transformation visuelle, assez stable dans le temps et dans sa valeur, d'une surface cible continue ou d'une zone physique visuellement délimitée (comme la surface du strip papier). L'exemple de la coloration des flux par la projection d'un rectangle de couleur sur le strip, produit une modification « intrinsèque » et homogène du matériau papier. Elle est ressentie comme une teinture « dans la masse » du papier (cf. Figure 116 à gauche). Bien évidemment, ce mélange ne fonctionne bien qu'avec un calage géométrique précis de la projection sur la surface. Un rendu lumineux débordant du support amoindrirait cette sensation.

La *surimpression* nécessite un contraste, ou discontinuité visuelle, suffisant entre image projetée et support (lumineux, sémiologique ou sémantique). La

perception par l'utilisateur d'une séparabilité de l'objet visuel projeté avec son contexte dépend de l'auteur de la trace et de sa pérennité. La trace (physique) laissée par l'opérateur avec le stylo est perçue comme partie intégrante du strip, c'est le strip annoté qui sera archivé. Les traces numériques — plutôt « éphémères » — comme la surimpression de données système dynamiques (cf. Figure 116 à droite) correspondent à un « calcul » opéré par le système ou sont la projection de données temps réel (c'est-à-dire hétérogènes de la représentation temporelle de l'objet strip). Elles peuvent être perçues par le contrôleur, de par leur nature « algorithmique », comme exogènes au strip papier et plus encore si elles sont très « changeantes » (visuellement instables). Ces expressions de sens et ces comportements graphiques internes à l'objet projeté, renforcent l'identification de la surimpression visuelle en tant qu'objet symbolique particulier, virtuel, et issu du système.

3.4.1.2.3. Dimensions perceptuelles des matériaux et des impressions

Fusion ou surimpression, le mélange visuel multicouche du strip et donc les capacités de représentation et d'usage de l'objet d'interface strip augmenté, sont fortement dépendantes des propriétés visuelles et de matériau du support physique (réel) d'impression et des différentes impressions (réalisées) physiques et virtuelles. Ces propriétés concernent, par exemple, le degré de matérialité et de plasticité de l'objet, les qualités d'opacité ou de transparence du support ou du pigment et sa capacité à pouvoir être mélangé, ou enfin le niveau de persistance temporelle des artefacts.

Ces propriétés perceptuelles peuvent être analysées comme des **dimensions de design** qui doivent être appréhendées et utilisées à bon escient pour la conception multicouche d'un objet mixte de représentation. Dans Strip'TIC, ces dimensions peuvent être regroupées en trois catégories de propriétés : propriétés de matérialité du matériau physique, propriétés d'opacité et de porosité du médium, et propriété de permanence et de persistance temporelle. Nous définissons ces dimensions par un couple de termes présentant les deux extrémités du continuum :

[D.1] matérialité-virtualité

[D.2] rigidité-plasticité



Figure 117 : Le strip papier, un support physique souple spécialement adapté pour la manipulation et pour l'écriture

Le support papier du strip associe un matériau physique concret, saisissable, préhensible (*graspable*), avec une forme « solide » presque sans épaisseur de type surface. Cette nature duale du support offre une grande légèreté et

permet une fluidité de la manipulation : glissement au doigt du strip sur la surface du tableau, pincement de saisie à deux doigts, torsion non déformante du support papier, empilement et manipulation aisés de plusieurs strips à la fois. Cette particularité donne au contrôle avec le strip papier une performance de l'usage manuel très adapté pour organiser librement le tableau de strips et utiliser pleinement la bimanualité (cf. Figure 117 à gauche). De plus, la nature particulière du papier comme surface-média naturelle de l'écrit, donne une forte cohérence à son utilisation comme support imprimé (impression par l'imprimante à strips des informations plan de vol) et support d'écriture au stylo Anoto (cf. Figure 117 à droite).

Ces caractéristiques matérielles et sémantiques apportent ainsi la *plasticité* nécessaire à l'appropriation de ce support de représentation du trafic comme un espace personnel d'exploration, de communication et de saisie pour les contrôleurs. En opposition à la nature externe de la représentation temps-réel de l'image radar (système), cette plasticité « familière » du papier permet également une souplesse d'usage de l'objet par le contrôleur. Par exemple, utiliser un strip « retourné » pour écrire une note ou créer un élément de structuration du tableau. Ces qualités du support papier des strips ont été analysées dans plusieurs articles comme [Mackay 1999].

Les impressions physiques « indélébiles », imprimées ou écrites à l'encre sur le papier du strip bénéficient d'une *matérialité* associée « non séparable », comme acquise par « procuration ». Elles sont physiquement parties intégrantes - non détachables ni effaçables - de l'objet matériel. Les tracés et écritures réalisés avec le stylo Anoto produisent à la fois des traces encrées physiques (encre du stylo) et des traces numériques, « encre numérique » des traces Anoto enregistrées et projetées. La plasticité relative ressentie de ces traces dépend de leur rôle dans l'activité et du scripteur de la trace : l'impression au *toner* des informations plan de vol issues du système est perçue comme rigide et temporellement datée (datant de l'arrivée du strip sur le secteur) ; les informations manuscrites par les contrôleurs sont modifiables : les contrôleurs peuvent corriger une valeur en réécrivant une partie de la valeur ou même écrire une clearance en plusieurs fois (heure, puis minutes). Elles sont également rayables ou soulignables, itératives et superposables. Leur datation est à la fois précise - donnée « date » des points du tracé de l'enregistrement Anoto - ou plus relative - projection additionnelle numérique des seuls tracés actifs, correspondant souvent aux dernières saisies. Ces impressions « encrées » produites avec le stylo sont ainsi ressenties comme plutôt plastiques.

La « matérialité » et la « plasticité » des projections virtuelles dépendent de la modalité du mélange visuel, de la dynamicité des informations, de l'affichage. Une projection avec une modalité de fusion optique, par exemple la recoloration des strips, présente une certaine matérialité et « staticité » car étant perceptuellement non séparable du support papier et stable dans le temps. Une projection lumineuse de type surimpression est perçue par les contrôleurs avec une dimension de virtualité d'autant plus forte qu'elle affiche des informations dynamiques et « innovantes » par rapport à l'usage traditionnel du strip papier. Ce dernier aspect a été exprimé par les contrôleurs comme une limite possible pour la conception du strip augmentée : en effet, la projection sur le strip papier de fonctionnalités trop « ordinateur », par exemple le calcul de turbulence, risque de dénaturer leur perception de la représentation strip et son usage sur la position de contrôle.

[D.3] opacité-transparence

[D.4] occultation-porosité

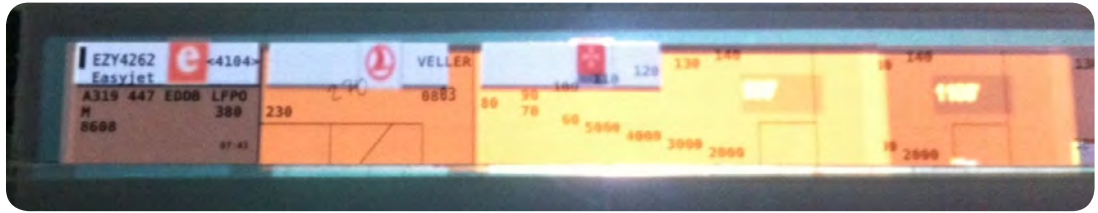


Figure 118 : Effet visuel produit par la superposition physique des strips papier

Comme pour la dimension *matérialité*, le niveau d'opacité ou de transparence et son effet corolaire sur l'occultation visuelle produite dépendent principalement de la nature physique, solide ou lumineuse du matériau. La Figure 118 présente un effet de bord intéressant produit par la superposition physique partielle de trois strips. Le support papier, opaque, des strips supérieurs masque (occultent) la partie physique des strips positionnés en dessous - support papier mais aussi impressions physiques et écritures à l'encre - comme le strip papier masque toujours la projection par-dessous le tableau du strip virtuel associé. Les projections lumineuses hautes (projetées par-dessus sur le tableau) des trois strips, sont intégralement apparentes. La qualité de transparence des images lumineuses projetées garantit un accès total à l'information imprimée directement (toner et encre) sur le support visible. Ainsi nous pouvons voir sur la Figure 118, des surfaces (zone de callsign ou fond du niveau actif) et informations textuelles (niveau vertical de l'avion) projetées, laisser visuellement accessibles les tracés et données physiquement imprimées. Est seulement perceptible une légère modification locale de la couleur visuelle du tracé. Enfin, les trois projections lumineuses de recoloration des strips produisent un curieux effet de bandes colorées issu du mélange lumineux (transparent) des trois rectangles colorés décalés.

Ces deux effets conjugués, d'opacité-occultation du support papier et de transparence-porosité des projections lumineuses renforcent la continuité d'affichage et d'usage entre strip papier et strip virtuel. Le strip papier posé sur le tableau masque le strip virtuel et affiche les données projetées par-dessus. En l'absence du strip papier, le strip virtuel reproduit les données imprimées (dont les tracés de structure) et affiche l'ensemble des informations projetées qui ne sont plus « arrêtées » par le support papier : données Anoto actives écrites au stylo par les contrôleurs, feedback et informations dynamiques du vol produites par le système.

[D.5] persistance-éphémérité temporelle

Une dernière dimension perceptuelle concerne la persistance temporelle des couches visuelles du strip augmenté. Le support papier reste toujours accessible, même après la sortie de secteur du vol et l'archivage du strip : ce strip papier, avec toutes ses impressions et annotations physiques est « repreneable » ou consultable dans l'état de son archivage (cf. Figure 119 à gauche). Les impressions physiques des données plan de vol sont pérennes jusqu'à une réimpression éventuelle du strip. Lors d'un changement explicite des données plan de vol réalisé par le contrôleur, elles donnent lieu à une réactualisation du strip papier (strip «MOD»). Les écritures manuelles portées sur le strip avec le stylo Anoto pourraient-être dans ce cas réimprimées par le système via l'imprimante à strips.

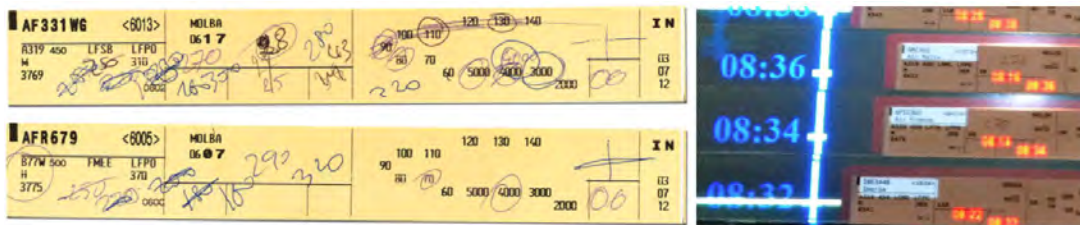


Figure 119 : Persistance des informations imprimées sur le strip :
un strip physique archive l'ensemble des impressions toner et manuscrites (à gauche),
projection éphémère d'informations HAP calculées par le système (à droite).

La persistance des traces lumineuses est plus éphémère. Tout d'abord, leur persistance visuelle dépend du positionnement d'un strip papier sur le tableau ou du maintien en son absence d'un strip virtuel. De plus de nombreuses informations « système » sont dynamiques ou projetées uniquement le temps d'un feedback ou d'une interaction, par exemple les informations de filtrage (cf. Figure 106) ou l'extension du strip (cf. Figure 107). La Figure 119 à droite présente l'affichage lumineux d'informations de séquençage d'atterrissages et d'heures de sortie correspondantes des stacks (HAP) (voir 3.3.3.2). Ces informations sont calculées par le système sur demande du contrôleur et projetées elles aussi de façon éphémère sur les strips, durant le temps de l'interaction de séquençement.

3.4.2. Continuité de l'activité : encodage et programmation de l'action

3.4.2.1. Encodage temporel de l'espace de travail

Dans un article journal « The intelligent use of space » [Kirsh 1995], Kirsh décrit comment les arrangements spatiaux soutiennent les activités d'experts impliquant une phase de préparation et une forte cadence de la phase d'exécution. Dans ce cadre, les utilisateurs experts doivent s'assurer que les informations nécessaires pour agir rapidement seront « localement » disponibles, et que leurs actions pourront ainsi être réalisées d'une manière presque automatique. À cette fin, ils organisent et structurent en avance de phase leur espace de travail physique dans le but futur de simplifier les choix, d'écarter les décisions non pertinentes, d'encoder les conditions préalables nécessaires, et de mettre en évidence l'action suivante à réaliser. Pour Kirsh, l'arrangement spatial encode naturellement l'ordonnancement temporel des tâches : les éléments disposés spatialement en séquence pouvant être lus directement comme indiquant l'ordre dans lequel ils doivent être utilisés.

Mais cet encodage de l'espace ne constitue pas seulement une programmation temporelle *impérative* d'un ordonnancement des tâches à effectuer. L'arrangement spatial permet aussi la programmation visuelle de particularisation (décalages de strips) ou d'alarmes (strip posé en travers sur le tableau). Cette programmation visuelle *interactive* constitue des *callbacks*, qui seront déclenchés non pas par un *timer* (temporel) mais par l'acte de regarder une zone particulière de l'espace du tableau : formant ainsi une sorte de « callback spatial ».

La Figure 120 présente à gauche l'organisation d'un tableau de strips sur une position opérationnelle du centre de contrôle en-route de Bordeaux (CRNA/SO) et à droite la configuration spatiale des strips sur le tableau de Strip'TIC

au cours d'une séance de simulation de contrôle d'approche. L'utilisation du tableau de strips par les contrôleurs, notamment le ré ordonnancement spatial continu des strips sur le tableau, leur permet d'organiser le trafic en flux et de planifier le trafic. Le positionnement initial des strips, les alignements et décalages, et surtout le déplacement progressif des strips sur le tableau correspondent aux différents flux géographiques des avions évoluant sur l'image radar. D'autre part, ils permettent au contrôleur de programmer visuellement sa supervision et ses actions de contrôle sur les avions du trafic. Harper [Harper 1991] souligne comment ces arrangements des strips par les contrôleurs aériens encodent un ensemble ordonné de tâches à réaliser : *«Le travail des contrôleurs aérien ne ressemble pas à celui d'une chaîne de montage où une séquence répétitive de procédures doit être strictement suivie, mais à un travail qui consiste à positionner les tâches à réaliser dans une séquence d'étapes qui peuvent être suivies».*



Figure 120 : Organisation spatiale du tableau de strips : dans le centre de contrôle en-route de Bordeaux (à gauche), sur le prototype Strip'TIC (à droite).

3.4.2.2. Programmation de l'action

Pour le contrôle d'approche, cette organisation de l'espace du tableau permet de réifier « l'écoulement » temporel des flux de vols (du haut vers le bas du tableau) de l'entrée dans le secteur vers la plateforme aéroportuaire et la piste d'atterrissage. Chaque ligne physique du tableau permettant de séparer verticalement (altitude) et temporellement (séquence d'arrivée) les vols. Dans une configuration de type « tour », la piste est matérialisée par un tracé au bas du tableau et protégée en cas de besoin (risque d'intrusion ou traversée de piste) par un obstacle physique, par exemple le bras du contrôleur, ou lumineux par exemple dans Strip'TIC par la projection de croix rouges par-dessus la zone de piste.

Ces ordonnancements spatiaux et temporels du tableau de strips relient implicitement les deux représentations que sont l'image radar et le tableau de strips. L'image radar présentant une position géographique (vue de dessus) des vols et un affichage temps réel du trafic. Le tableau de strips, affichant la planification de chacun des vols pour le secteur. L'utilisation complémentaire de ces deux représentations connecte les deux « échelles de temps » (temps continu du tableau et temps réel du radar) et permet aux contrôleurs de voir ce qu'ils doivent faire, « maintenant », « dans un moment », « plus tard »... Pour programmer précisément son action dans le temps, le contrôleur s'appuie également sur sa connaissance intime du temps qu'il mettra lui-même à réaliser

l'action, en fonction du contexte, y compris l'évaluation de sa propre charge cognitive de sa fatigue ou de son habileté : « *C'est votre horloge interne, vous savez combien de temps il vous faut pour effectuer des actions standards* »

3.4.2.3. Exemple 5 : timer de turbulence de sillage

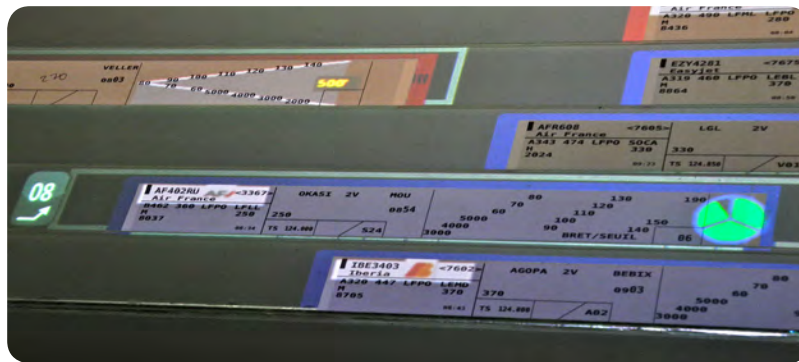


Figure 121 : Un test de codage d'une fonction « timer » pour indiquer au contrôleur un délai d'attente avant décollage dû à une turbulence de sillage

Lors des ateliers, un contrôleur a proposé spontanément l'idée de l'affichage d'un compte à rebours pour le déclenchement d'une action de rappel, « *quelque chose pour rappeler au contrôleur tactique qu'il est temps d'agir, de donner un ordre au pilote, puis même à quel point il est derrière* ». « ... 10 ... 9 ... 8 ... 0 ... -1 ... -2 ... », le décompte ne déclenchant pas lui-même l'action. Le contrôleur pourrait ainsi laisser filer le chronomètre, au-delà du « 0 » et percevoir de combien il a dépassé ce temps indicatif. Ce type de lien de minuterie contrôle le temps qui passe à la place du contrôleur en le référant au temps réel, et décharge celui-ci dans une tâche de surveillance ou de reprise d'actions planifiées, mais évite aussi des erreurs. « *Intégrer une telle aide à la décision c'est quelque chose qui fera gagner du temps au contrôleur, qui lui permettra entre autres d'éviter de faire des erreurs en particulier sur la turbulence de sillage - parce que je suis sûr que nombreux sont ceux qui font des erreurs, qui ne sont pas graves en l'occurrence sinon il y aurait des accidents mais des erreurs d'une minute, de 30 secondes - des erreurs comme ça, il y en a plein qui en font ...* ».

La Figure 121 présente la conception de l'affichage d'un feedback temporel superposé au strip pour représenter un timer d'attente de « *turbulence de sillage* ». L'avion (le strip) est positionné sur une zone du tableau qui représente la piste (matérialisée par un rectangle blanc). Un précédent décollage vient d'avoir lieu dont le strip a été remonté sur le tableau et permuté sur la zone piste du tableau avec le strip de ce vol en attente d'une instruction de décollage du contrôleur aérien. Les contrôleurs doivent respecter un temps minimum d'espacement entre deux décollages, et notamment après le décollage d'un avion gros-porteur (ici un Boeing 777) qui crée un effet de turbulence de sillage nécessitant un délai d'attente de deux minutes pour le décollage suivant d'un avion moyen porteur (ici un Airbus 320). On peut voir sur la Figure 121 l'affichage par projection, sur la droite de la zone piste, d'un timer qui s'est déclenché lors du lever de roues du vol précédent (correspondant à la création de la turbulence de sillage). Ce timer circulaire, représentant le délai d'attente minimal, se remplit progressivement avec une teinte évoluant progressivement de l'ambre au vert. La complétion de ce warning permet au contrôleur de percevoir le temps à partir duquel il pourra donner une instruction de décollage au pilote.

3.4.3. Continuité physique-numérique et capacités d'externalisations cognitives

3.4.3.1. Externalisation des fonctions cognitives

Pour agir, à court ou long terme, notre cerveau utilise des capacités essentielles appelées fonctions cognitives : la mémoire, l'attention, le langage, les fonctions exécutives et les fonctions visuo-spatiales. Les contrôleurs aériens en service opérationnel sur une position mettent en oeuvre l'ensemble de ces fonctions, par exemple pour percevoir et organiser l'information à partir de l'image radar et du tableau de strips (fonctions visuo-spatiales), la retenir-mémoriser le temps d'un processus mental ou d'une tâche - de quelques secondes à plusieurs heures (mémoire), élaborer une stratégie, résoudre un conflit ou planifier l'action (exécutive), collaborer avec les autres contrôleurs (langage) ou exécuter une procédure de contrôle, par exemple une clearance, à la fréquence et au strip (attention). Sur une position actuelle, le contrôle au strip papier est déjà basé sur une externalisation cognitive de la représentation des vols, de l'organisation du trafic, de la planification du trafic et des actions ou de la communication silencieuse entre contrôleurs sur la position. Le dispositif interactif tangible de Strip'TIC permet aux contrôleurs d'externaliser ces fonctions cognitives, selon leurs besoins, de façon plus large et plus performante, notamment à cause de l'intégration de ces externalisations au système ATC lui-même et aux capacités de calcul, d'augmentation de l'information, de partage et d'activation des données ou d'exécution des instructions et procédures offertes par le système, et de la double nature physique et numérique de l'espace interactif.

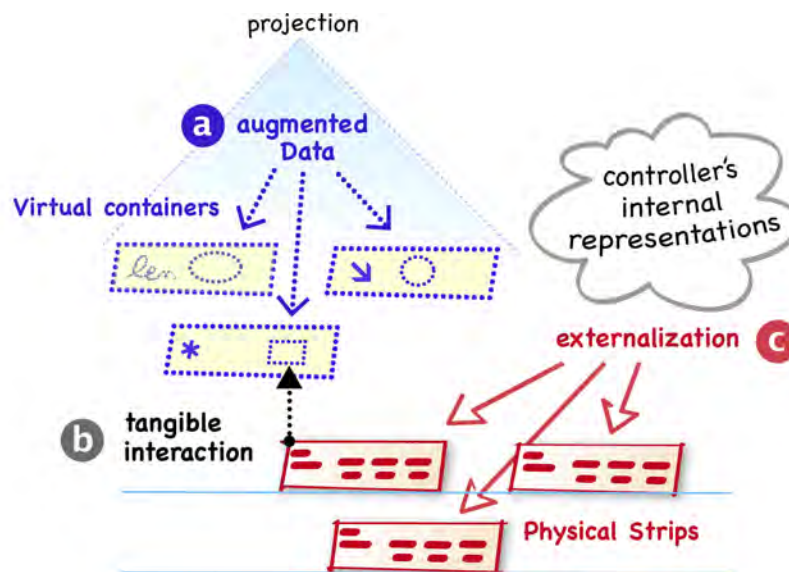


Figure 122 : Schéma du dispositif interactif tangible de Strip'TIC présentant :
 b) les strips physiques positionnés sur le tableau, permettant à la fois de contrôler le modèle de données ATC et (a) l'affichage des informations augmentées projetées par le système, et (c) servant de supports à l'externalisation cognitive des informations et des actions des contrôleurs pour la gestion du trafic aérien

La Figure 122 présente un schéma de principe du dispositif tangible Strip'TIC. Les strips physiques sont au cœur du système. Ils permettent des interactions tangibles de contrôle (b) de l'interface système et du modèle de données. La fonction de contrôle de l'interface - de type Window Manager (cf. 3.3.2) - assure la création et la composition de vues logiques ou containers virtuels

associés aux strips papier sur le tableau, et gère l'affichage par projection des représentations numériques : strip virtuel et données augmentées (a). Le support tramé du strip est également une surface « sensible » permettant de générer avec le stylo Anoto des événements en entrée de type pointeur (click, move...) et de saisir des tracés (gestes, écritures). De plus, ces strips tangibles sont le support incarné des informations : informations physiques imprimées (données de vol et écritures au stylo Anoto) et informations numériques projetées (feedbacks, données augmentées). L'utilisation de ces strips numériques en papier sur le tableau : arrangements spatiaux, impressions et écritures, feedbacks système, programmation de l'action, mais aussi les interactions continues avec les supports physiques comme le maintien au doigt du strip ou la tenue dans la main d'un strip en attente, constituent pour l'équipe de contrôleurs de la position des externalisations cognitives (c) de leur gestion du trafic.

3.4.3.2. Continuité physique-numérique : la « révolution cognitive »

Lors d'une conférence INRIA en 2007 à Lille, Michel Serres [Serres 2007] exposait comment les nouvelles technologies de l'information et l'utilisation des outils informatiques généraient une véritable « révolution cognitive » et poussaient l'homme à toujours davantage externaliser sa mémoire et son usage de l'information, mais aussi des facultés comme la raison ou l'imagination.

Les contrôleurs utilisent déjà le tableau de strips papier comme un outil d'externalisation de représentation et de planification du trafic et de programmation de leurs actions. Avec Strip'TIC, ils expérimentent de nouvelles formes et capacités d'externalisation rendues possible par les connexions réalisées entre monde physique et numérique et donc par l'augmentation numérique des potentiels d'externalisation de tels espaces et objets hybrides. Par exemple, ils peuvent déléguer au système des fonctions cognitives visuo-spatiales de recherche d'information comme le filtrage des vols (cf. 3.3.1.2), ou d'attention et de surveillance, comme le feedback du « timer de surveillance de sillage » (cf. 3.4.2.3). Ils peuvent mettre à profit les capacités de calcul du système pour les aider à calculer et planifier une séquence d'atterrissage, comme l'outil de calcul tangible des heures de sortie de stacks (cf. 3.3.3.2), ou calculer et transmettre à l'avion un contrat de vol 4D à exécuter. Ou encore utiliser le support mixte d'un strip augmenté pour mémoriser et communiquer sur demande un message à destination d'autres contrôleurs sous une forme langagière, comme l'espace de notation offert par l'extension virtuelle du strip (cf. 3.3.1.3).

L'expérience du dispositif tangible et la compréhension fine par les utilisateurs de la double nature physique et numérique des objets de l'interface et des comportements différents de ces deux dimensions de l'espace interactif, permettent aux contrôleurs de s'approprier les qualités de ces objets mixtes et de prédire les comportements. Elles leur permettent ainsi de différencier leur usage comme supports d'externalisation cognitive, ou de confronter deux formes d'externalisation possiblement en conflit.

3.4.3.3. Discontinuité entre externalisations cognitives : des alarmes implicites

Dans l'interaction de calcul tangible d'une séquence de sortie de stack de l'exemple 4 (cf. 3.3.3.2), un effet de bord intéressant a été relevé pour la détec-

tion d'erreurs. Le contrôleur adresse physiquement ses avions dans les stacks et les connecte virtuellement aux niveaux de vol de ces stacks, créant ainsi un lien virtuel. Il construit ensuite un ordre de sortie des avions des stacks et dans la séquence en positionnant et déplaçant à volonté les strips papier sur les lignes physiquement délimitées du tableau. Pendant ces explorations d'arrangement, le lien virtuel connectant visuellement le strip papier au niveau de vol est maintenu, s'adaptant aux nouvelles géométries spatiales. Une erreur de positionnement, c'est-à-dire le fait de positionner relativement deux avions dans un ordre de séquence impossible (par exemple de faire sortir un avion avant un autre situé plus bas dans le même stack) induit un effet visuel implicite de croisement des lignes de connexion.

Ce « conflit » ou cette discontinuité entre deux externalisations explicitement reliées, externalisation physique du placement des strips et externalisation virtuelle de la connexion aux niveaux, produit une nouvelle forme d'externalisation, de surveillance des erreurs, avec un « callback spatial » d'alarme indiquant l'erreur de séquençement. La nature lumineuse de l'externalisation supportée par une représentation virtuelle projetée la rendra à la fois visuellement résistante (non masquable) et transparente (non opaque) aux représentations physiques superposées.

La double nature physique et numérique des objets de l'interface permet au contrôleur de différencier leurs usages comme supports d'externalisation cognitive. Par exemple l'utilisation différente des strips papier et des strips virtuels.

3.4.3.4. Exemple 6 : utilisation de strips virtuels isolés

Lors des ateliers, les contrôleurs ont évoqué des scénarios d'usage différenciés pour les strips physiques augmentés et pour des strips virtuels isolés.

Le strip papier, augmenté ou pas selon sa présence sur le tableau, reste le représentant unique et physiquement réifié du vol et de la responsabilité du contrôleur pendant la traversée du secteur par l'avion. Le strip virtuel associé - projeté sous le strip papier - n'étant qu'une vue complémentaire, solidaire de cet objet de référence. Dans ce cas, les externalisations cognitives sont nombreuses et très diversifiées comme décrites dans la section précédente, et concernent de façon assez homogène le couple physique-virtuel du strip papier augmentée et de son double virtuel.

Pourtant, les contrôleurs admettent l'usage potentiellement intéressant d'un strip virtuel isolé (non relié à un strip papier) pour répondre à certaines situations et pour des usages particuliers. Ils ont ainsi décrit le cas de vols « intéressants » la position de contrôle mais qui ne sont pas sous la responsabilité effective de leur secteur contrôlé. C'est le cas des avions qui évoluent en marge du secteur ou qui viennent « couper » de façon provisoire le secteur, d'avions non contrôlés (vol à vue) concernés ou interagissant avec le secteur d'espace (risque de conflit), d'avions dont les strips papier ne sont pas encore imprimés sur la position (trop loin du secteur), ou de strips en cours de transfert vers une autre position (shoot, dégroupement). Dans ces situations, la perception du degré de « propriété » et de responsabilité du vol est relative et à leur engagement « officiel » (responsabilité) ou « préempté » par exemple par une délégation temporaire du vol suite à une coordination avec le secteur en charge.



Figure 123 : Affichage d'un strip virtuel «informationnel» au bas du tableau de strips, correspondant à un vol non directement en responsabilité des contrôleurs de la position

Les contrôleurs se disaient de ce fait très à l'aise avec l'emploi temporaire d'un strip virtuel isolé, leur utilisation se limitant alors à insérer une représentation du vol au sein, ou plus exactement à la marge de leur espace de planification du trafic (cf. Figure 123), pour maintenir l'attention au vol et garantir si besoin un accès rapide à l'information. « *En fait, avoir le strip virtuel avec les données sur le vol réel... c'est juste une question de timing, s'il [le contrôleur du secteur adjacent] appelle, qui nous permettront de gagner du temps !* ». Les contrôleurs ont utilisé le terme de « *strip virtuel informationnel* » pour identifier ces strips, ce qui traduit une certaine spécialisation de l'externalisation cognitive associée, qui correspond à une mémorisation (stockage) de l'information. Dans ce sens, cet objet serait-il toujours un strip ou une représentation différente comme une vue ou fenêtre de propriété sur un vol (des vues de cette nature appelées *dyps* existent dans les interfaces de contrôle). La forme de cette externalisation virtuelle peut être porteuse d'information. Des contrôleurs proposaient ainsi de représenter les strips avant leur intégration physique sur le tableau par une représentation virtuelle « réduite ». Un « *demi-strip* » ou même un strip virtuel dont la taille et l'information grandiraient progressivement pour mieux représenter son arrivée dans le secteur et le différencier des autres strips. L'intégration finale du strip physique imprimé sur le tableau remplace ce strip « réduit » et modifie la nature cognitive de la représentation du vol, de son statut de contrôle (responsabilité) et des actions possibles.

3.5. Continuité interactive entre surface et espace

Un projet, dont j'ai assuré l'encadrement avec C. Letondal et R. Lesbordes, a été proposé à quatre étudiants du master 2 IHM de Toulouse, avec pour objectif l'exploration de l'interaction gestuelle (3D) sur une position de contrôle aérien augmentée. Il s'agissait d'évaluer la pertinence d'ajouter de l'interaction par le geste au sein du dispositif Strip'TIC et d'implémenter ces interactions. Les étudiants ont conçu et développé un ensemble d'interactions gestuelles basé sur l'utilisation d'un capteur de type Kinect for Xbox 360, placé au-dessus du tableau de strips, et de la bibliothèque logicielle 3-Gear (Robert Wang, Chris Twigg & Kenrick Kin), pour modéliser la position 3D des mains (22 points de contrôle par main) et analyser les gestes des contrôleurs. Ces gestes étaient traités par le système par un ensemble d'automates utilisant la librairie SwingState [Appert 2006]. Des automates de bas niveau permettaient de gérer les événements gestuels génériques, par exemple *HandOpen* (ouverture de la main) ou *HandClose* (fermeture de la main). Ces automates de bas niveau

étaient composés en automates de haut niveau, par exemple *MoveSkinStripInSpace* (déplacement d'une copie de strip virtuel), qui correspondaient à des événements plus complexes liés à l'activité, renvoyaient au système des messages Ivy [Ivy] qui permettaient de gérer l'interaction et l'affichage des feedbacks.

Ce travail, qui fait l'objet d'une publication [Gauthier 2014], nous permet d'interroger le concept de continuité sur deux aspects concernant les rapports entre espace et surface, physique et virtuel.

3.5.1. Continuité interactive entre contact de surface et espace 3D

Le premier aspect concerne la continuité entre surface et espace 3D. Dans la plupart des dispositifs interactifs, une discontinuité très forte existe entre surface de contact et environnement physique. La surface permet l'affichage numérique (écran) et l'interaction en entrée (curseur ou tactile). Dans ce mode, les gestes effectués dans l'espace sont transformés en points ou trajectoires de surfaces. Les interactions hors contact, comme les survols sont effectuées très proche de la surface et transformés eux aussi en coordonnées 2D. De l'autre côté, les interactions gestuelles dans l'espace sont généralement métaphoriques, parfois effectuées sur un substitut physique, et en discontinuité avec l'objet réellement manipulé. Captées par des dispositifs externes (ex. Kinect) elles sont transformées en événement « abstraits » pour l'application.

La Figure 124 présente une interaction gestuelle réalisée par les étudiants avec le prototype Strip'TIC. L'interaction est initiée et terminée par un touché (vue 2 et 7). Entre ces deux touchés, les gestes sont effectués dans l'espace au-dessus du tableau permettant de déplacer le strip virtuel par-dessus les strips physiques du tableau. Il faut noter aussi les feedbacks projetés pendant l'interaction sur la main de l'opérateur (vue 4 et 5).

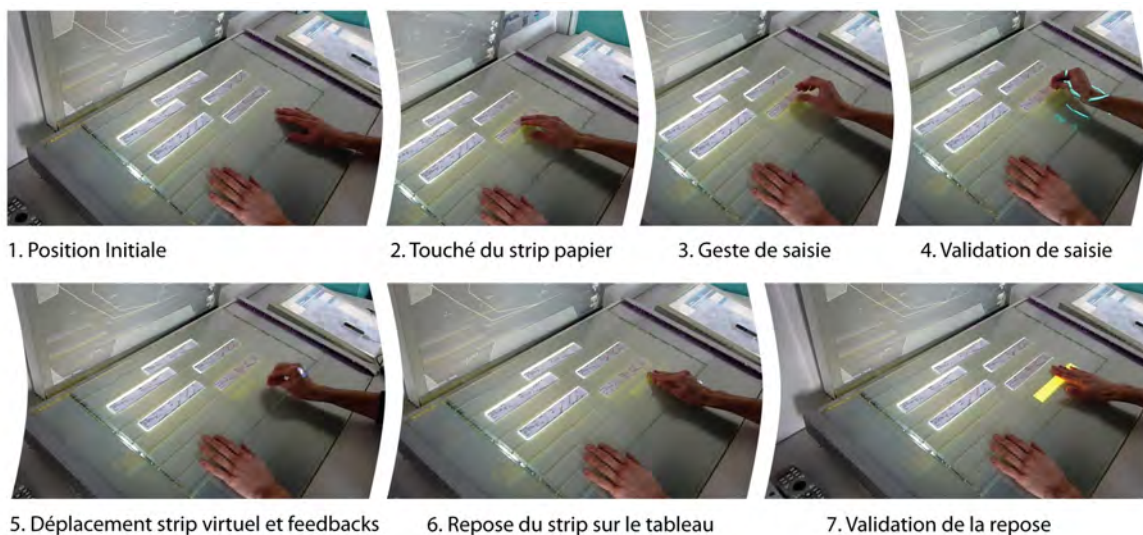


Figure 124 : Séquence de photos présentant une interaction gestuelle de copie d'un strip virtuel à partir d'un strip papier dans Strip'TIC [Gauthier 2014]

3.5.2. Continuité physique-numérique par l'interaction gestuelle

Ces interactions gestuelles et le comportement du dispositif perçu par l'utilisateur renforcent encore la continuité entre physique et numérique des objets de l'interface. La Figure 124 montre la copie d'un strip papier en strip vir-

tuel, réalisée à partir et d'un geste d'« épluchage » de la « peau » (surface) du strip, puis du déplacement dans l'espace de ce strip virtuel. La limite entre physique et numérique d'objets interactifs est ici particulièrement effacée. Pour les contrôleurs aériens utilisant Strip'TIC, la perception de ce comportement continu entre strips virtuels et physiques les amène à modifier l'image mentale initiale qu'ils avaient de la répartition des rôles entre strips papier et copies virtuelles. Cette répartition des rôles était caractérisée par l'attribution de la responsabilité pleine et entière aux seuls strips physiques et par une prévention à l'ajout d'informations dynamiques sur le strip papier. Ils peuvent ainsi être amenés à proposer plus librement de nouveaux rôles aux strips virtuels et à accroître l'information projetée sur le strip papier.

3.6. Conclusion et perspectives

3.6.1. Travail réalisé

3.6.1.1. Identification des aspects collectifs et personnels de la recherche

Identifier la part personnelle du travail présenté s'appuyant sur un projet de recherche collectif n'est pas une chose aisée. Tout d'abord il convient de rappeler que cette troisième partie ne vise pas à présenter les résultats, pour l'essentiel déjà publiés, du projet Strip'TIC. Notre objectif était ici d'utiliser les travaux menés pour observer des éléments intéressants de notre problématique de recherche — la continuité — et permettant d'explorer et de développer des apports propres à ce concept et à ma recherche.

Néanmoins, il est difficile de séparer de façon rigoureuse, à la fois le travail réalisé dans le cadre du projet lui-même et formalisé dans les publications, mais aussi la part personnelle ou collective des idées et des apports. D'où, quand, de qui et avec qui, naissent et se développent ces idées ? Une partie des contenus présentant la recherche, l'aspect technique, l'état de l'art, ou les fonctions et exemples d'interaction est issu d'un travail collectif, initié et piloté par Christophe Hurter, dont je n'ai pris qu'une « simple » part, même si cette part a été engagée, active et suivie. Les aspects plus personnels développés en référence au concept de continuité sont eux-mêmes partiellement issus de réflexions partagées avec des chercheurs de l'équipe Strip'TIC. Je tiens à cet égard à souligner l'importance du travail et des discussions menés collégialement et plus particulièrement avec Catherine Letondal autour de Strip'TIC. Des idées et des contributions académiques importantes, appuyées sur une connaissance préalable des thèmes et des travaux de l'interaction tangible, ont été apportées par Catherine aux travaux de recherche et aux publications de strip'TIC. Ces contributions mais aussi des discussions plus informelles ont également nourri ma propre réflexion.

Ma contribution s'est centrée sur l'exploration et la formalisation des apports de la continuité dans le cadre des espaces interactifs *tangibles augmentés*. Les références externes à la continuité des espaces urbains (3.1), la présentation de l'évolution des interfaces contrôleurs et des travaux de recherche autour du strip (auxquels j'ai souvent pris part), et surtout, les apports du corps principal de cette troisième partie (3.3, 3.4), identifiant et discutant les continuités dans les espaces interactifs à partir des retours d'expérience de Strip'TIC, sont essentiellement personnels.

3.6.1.2. Synthèse et apports au concept de continuité

Nous avons mené une exploration du concept de continuité à partir de la démarche de conception du dispositif Strip'TIC. Nous avons identifié un ensemble de dimensions intéressantes de la continuité pour le design des espaces interactifs tangibles et augmentés, qui mêlent espaces physique et numérique. Ces dimensions ont été développées, discutées et illustrées autant que possible par des exemples existants implémentés dans Strip'TIC.

Un premier ensemble de dimensions concerne la continuité spatiale et d'interaction du dispositif interactif. La *Cohérence et continuité de l'espace d'interaction* (continuité **Acp.6**) réfèrent par exemple à la généralisation en *surfaces sensibles* des objets et plans du dispositif (réalisée dans Strip'TIC à

l'aide du tramage Anoto). Cette caractéristique permet d'interagir de façon homogène (à partir du stylo) sur l'ensemble des éléments de surface, objets strip compris (**Acp.5**), sur les différentes représentations d'une même information, ou de façon continue entre objets et surfaces. Elle apporte une impression de forte cohérence au dispositif et à l'espace interactif. La possibilité de réaliser des interactions continues entre objets et surface, comme entre strip et tableau, renvoie à la notion de *Continuité objet-substrat* (**Acp.2,5**). Cette continuité offre la possibilité de penser les relations entre objet et support, mais aussi d'étendre cet objet par le support et de rendre ainsi *plastique* un objet matériel rigide à partir de son hybridation physique-numérique.

La *Continuité de l'interface* (**Acp.1,3**) expose l'idée de *Window Manager Tangible* qui correspond à la gestion par le système d'un ensemble de vues logiques ou « *fenêtre-strip* » formées et contrôlées par un objet de représentation et d'interaction physique. L'interface assure la continuité physique-numérique par le tracking des objets physiques et la projection cohérente des informations numériques sur ces objets, et la gestion des événements issus ou liés à ces « *fenêtre-strip* ». L'utilisateur organise ces vues sur le tableau physique et par là même sur l'interface à partir du substrat physique des strips papier ou de la représentation virtuelle du strip. Ce dernier point illustre la *Continuité d'interaction physique et numérique* (**Acp.2,6**) ou la capacité d'interagir de façon similaire sur les représentations physiques ou virtuelles des strips, ou d'utiliser de façon coopérative les dimensions physiques et numériques des représentations et des interactions (comme pour le calcul tangible). Enfin, la *continuité interactive surfaces - espace* (**Acp.3,5**) décrit la possibilité d'interactions gestuelles continues sur une surface ou entre surfaces à partir de gestes réalisés dans l'espace. Cette dernière dimension se décline sur un aspect de *continuité multimodale* (**Acp.2,3**) du geste, débuté par une interaction de surface sur un objet, prolongé par une interaction avec l'espace et complété par une interaction de surface sur un objet ou un plan interactif de destination.

Un deuxième ensemble de dimensions concerne plus spécifiquement les questions de continuité visuelle. La *Continuité de représentation* entre physique et virtuel (**Acp.1,2**) décrit à la fois la nature *hybride* des objets de l'interface associant représentation physique (strip papier) et numérique (strip virtuel) et la nature *composite* des objets tangibles augmentés (ex. strips papier augmenté des projections lumineuses d'information). La nature *hybride* renvoie à perception d'un objet unique de sens (ici la représentation strip d'un vol), même si l'utilisateur peut dissocier perceptuellement cette double représentation ou même la séparer dans l'usage (donner le strip papier et conserver le strip virtuel). La nature *composite* relève de la conception en *couches* des objets mixtes de l'interface.

La perception induite pour l'utilisateur caractérise une *Continuité perceptuelle* (**Acp.2,6**) qui correspond à la fusion visuelle de ces *couches* : objet physique (support papier) et impressions physiques (impressions au *toner* des informations plan de vol et écritures manuscrites du contrôleur) et couches lumineuses des informations projetées par le système (saisies des contrôleurs, informations dynamiques ATC et feedbacks système). Nous avons analysé de façon détaillée les propriétés de cette fusion perceptuelle pour en définir des *dimensions perceptuelles des représentations mixtes*.

Un troisième ensemble de dimensions concerne plus particulièrement les questions de continuité dans l'espace temporel. La *Continuité de l'activité*

(Acp.2,4) expose les capacités d'utilisation de l'espace interactif [Kirsh 1995] pour encoder l'information et programmer l'action. L'encodage spatial de l'information caractérise la création explicite de sens au travers de l'organisation spatiale des objets. Continuités, comme la création de flux de vols, la particularisation des strips par décalage ou l'alignement d'objets permettant de les relier visuellement. Mais aussi discontinuité par la création d'hétérogénéité, comme le placement en travers du tableau d'un strip pour signaler son urgence. Ces encodages forment des *callbacks spatiaux* qui seront visuellement activés lors d'une consultation visuelle de la zone (Acp.2). La programmation de l'action concerne la planification de l'activité et le séquençement des actions (Acp.4). Par exemple l'ordre vertical des strips sur le tableau qui dirige l'action du contrôleur radariste. Ces encodages et programmations sont basés sur des externalisations de fonctions cognitives. La dimension de *continuité et discontinuité cognitives* (Acp.2,6) exprime les relations attendues entre ces externalisations et la perception induite de cohérence ou d'erreurs de leurs représentations. Ce dernier point reste à formaliser de façon plus précise. Quelles constructions de continuité et de discontinuités existent ou sont possibles, notamment dans ces espaces mixtes entre physique et numérique ? Quelles en seraient les propriétés et principes de design pour et entre ces deux dimensions ?

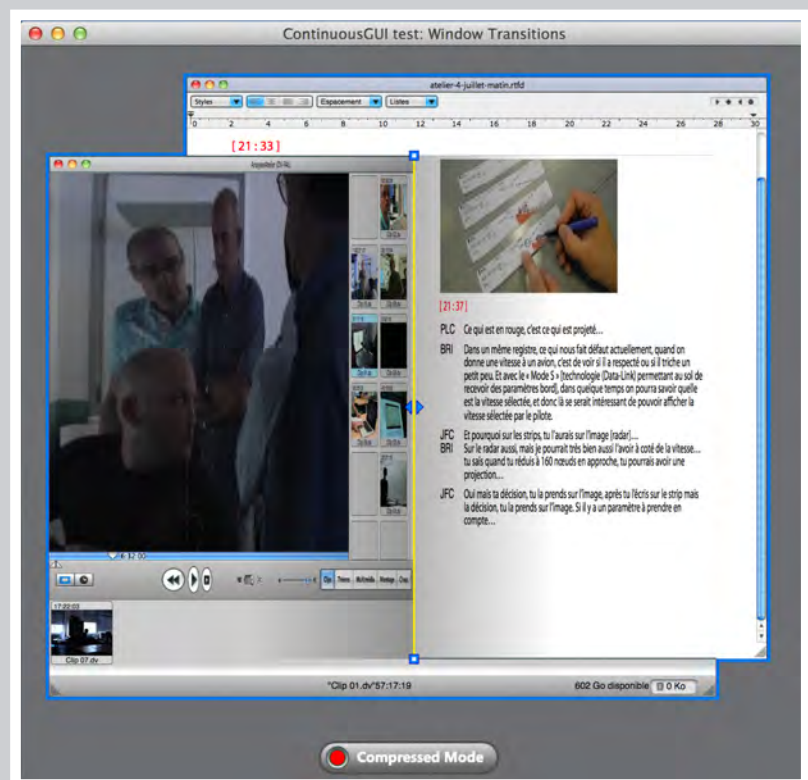
3.6.2. Perspectives

De par l'aspect exploratoire de ce travail d'identification, les perspectives sont nombreuses et ouvertes. Nous envisageons de poursuivre ce travail pour approfondir les apports de ces dimensions de la continuité pour le design d'espaces interactifs tangibles continus. Un terrain d'application possible serait celui des interfaces du cockpit dont la nature critique nous paraît favorable pour « *pousser aux limites* » le concept de continuité. Le contexte d'activité fortement coopératif du cockpit doit nous permettre de confronter le concept de continuité aux thématiques de la *coopération*, de la *conscience partagée* (mutual awareness) de la situation (situational awareness), de l'*interaction incarnée* ou de la *cognition distribuée*, et permettre de questionner plus globalement la continuité homme-espace et homme-système au sein de l'espace interactif.

Il s'agirait plus précisément d'intégrer à une surface continue d'interaction tactile, des objets physiques et des interactions dans l'espace physique, pour mieux prendre en compte les capacités sensori-motrices des pilotes et permettre une meilleure collaboration, dans le but de garantir la performance et la sécurité en contexte critique. Ce projet d'un *cockpit tangible* a fait l'objet d'une première publication : un papier WIP (poster) à la conférence *Tangible Embodied Interaction* (TEI) 2014 [Letondal 2014].

QUATRIÈME PARTIE

***Continuous GUI*: apports du concept de continuité pour architecturer l'interface graphique utilisateur des systèmes complexes.**



Aménager les limites et opérer des passages pour assurer une continuité de l'espace graphique et de l'interaction.

Continuous GUI : apports du concept de continuité pour architecturer l'interface graphique utilisateur des systèmes complexes.

« Une architecture poreuse est une architecture qui laisse la vie et les actions des hommes la traverser »

Benoît Goetz, *La dislocation*, éditions de la Passion, Paris, 2001.

Les deux premières explorations ont été menées dans le cadre de projets de recherche importants : coopération de recherche avec l'industrie pour la conception de typographies aéronautiques et projet collectif de recherche pour la conception d'un espace interactif tangible entre monde physique et numérique. Cette troisième exploration du concept de continuité est un travail mené de façon individuel, et qui s'appuie sur les précédentes explorations pour définir un nouvel axe de recherche. Elle se donne pour objectif de réfléchir au rôle de la continuité comme concept de sens pour penser l'architecture graphique de l'interface utilisateur.

Nous avons conduit cette troisième exploration dans une démarche interactive et itérative entre théorie et pratique. Au plan théorique, nous avons analysé les interfaces graphiques actuelles et leurs principes architecturaux. Nous avons identifié un ensemble de problèmes potentiels d'utilisabilité ou de limitations référant au concept de continuité. Puis nous avons réalisé le recueil sous la forme d'un état de l'art, d'un ensemble de travaux de recherche du domaine que nous associons au concept de continuité et qui concerne plus spécifiquement les aspects graphiques de l'interaction homme machine. Cet état de l'art est complété par des apports externes interrogeant les principes de la continuité dans les structures spatiales et architecturales. Dans un deuxième temps, nous présentons l'approche pratique, orientée design, que nous avons menée pour « expérimenter » la continuité dans les GUI. Nous en restituons un ensemble d'éléments d'idéation (interviews, ateliers) et de production (scénarios, *roughs* — croquis rapides d'idéation graphique — maquettes numériques et premiers prototypes logiciels).

4.1. Architecture graphique des interfaces : des choix impactant la continuité visuelle et d'usage ?

4.1.1. Principes graphiques de l'interface utilisateur

4.1.1.1. Vitalité du paradigme WIMP

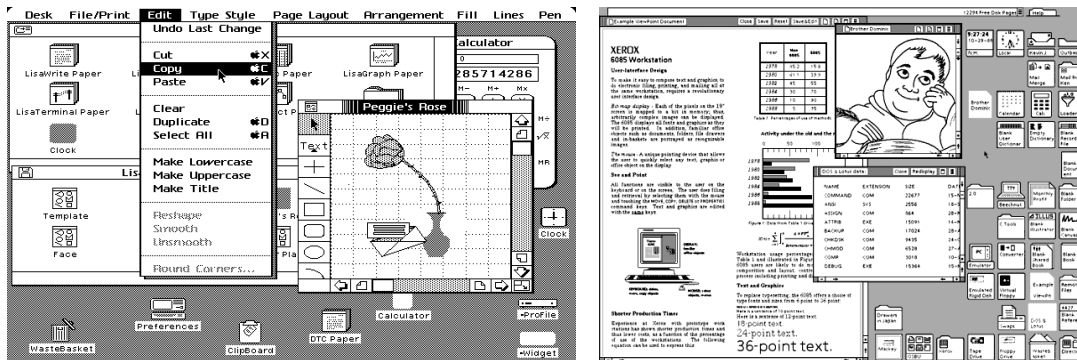


Figure 125 : Du Xerox Star au Lisa d'Apple, GUI, paradigme WIMP, et modèle d'affichage écran bitmap inspiré du papier et de l'encre

L'apparition et le développement rapide dès la fin des années 70 de l'ordinateur personnel ont révolutionné l'usage et l'interface utilisateur des systèmes informatiques. Le paradigme WIMP (acronyme de Windows, Icons, Menus and Pointing device) était initié au Xerox Parc avec l'interface graphique de l'Alto, avec pour modèle explicite du display, selon son manuel technique [Thacker 1979], les propriétés de flexibilité et d'organisation du papier et de l'encre (Figure 125 à gauche). Ce paradigme sera repris par Apple, avec le Lisa (1983) puis le Macintosh et le Mac OS system 1 (1984), imposant le concept d'interface graphique utilisateur (GUI), la métaphore du bureau, et la structuration graphique de l'écran en fenêtres superposables (Figure 125 à droite). Le modèle WIMP sera copié par les OS Windows (Windows 1.0, 85) et Unix (X11, 87) [Andries van Dam, 97], généralisant son usage pour les ordinateurs personnels et les stations de travail. Cette approche graphique de l'interface utilisateur, qui a su intégrer progressivement de nombreuses améliorations et extensions, façonne aujourd'hui encore l'interface graphique de nombreux dispositifs interactifs. Malgré cette vitalité du paradigme WIMP, de nombreux travaux comme ceux de Green et Jacob [Green 1991], North et Shneiderman [North 1997], ou Beaudoin Lafon [Beaudouin-Lafon 2000] ont mis en évidence ses limites et proposé des espaces de solutions pour des interfaces Non-WIMP ou Post-WIMP. Ces travaux qui ont contribué à faire évoluer les GUI actuels, se sont particulièrement focalisés sur l'interaction : modèles, styles et techniques d'interaction, par exemple le modèle MVC (Modèle-Vue-Contrôleur) [Reenskaug 1979], les concepts d'interaction directe [Shneiderman 1983] et d'interaction instrumentale [Beaudouin-Lafon 2000], ou le développement de nouvelles modalités d'interaction, tactiles multitouch, tangibles, incarnées, mixtes... alternatives au pointeur souris unique du paradigme WIMP. De nombreuses contributions ont plus spécifiquement concerné l'aspect visualisation, et également fortement contribué aux capacités d'expression graphique des interfaces actuelles, nous y reviendrons plus avant. Néanmoins, l'architecture logicielle des GUI reste largement fondée par des modèles et principes graphiques issus du WIMP, et ces choix d'architecture

contraignent les capacités d'usage des systèmes interactifs, pour les designers comme pour les utilisateurs. Par exemple, l'approche centrée application et le concept de fenêtres (ou pages), structurent toujours la conception des interfaces graphiques et entraînent un cloisonnement de l'usage pour l'utilisateur.

4.1.1.2. Principe de séparation et cloisonnement des activités

■ Architecture de l'interface graphique

La modularité est l'un des principes d'architecture logicielle facilitant le développement, la maintenance et la réutilisabilité de composants logiciels, rendant possible la réalisation de logiciels complexes. Ce principe de *découpage* associé à un principe de *séparation* — protection — logicielle des processus à l'exécution permet de garantir le comportement du système à l'interaction et de prévenir les erreurs. Pour l'architecture de l'interface, l'indépendance, ou du moins la minimisation des dépendances entre composants, est une règle de base... pour et au *bénéfice* du programmeur système. Ainsi le Window Manager gère la création, la composition et l'apparence graphique sur l'interface de fenêtres « indépendantes », permettant une exécution *interne* protégée du code logiciel d'une application, un rendu graphique des contenus clippé aux limites de la fenêtre, et la distribution des événements. Pour l'utilisateur, cette architecture du GUI permet l'ouverture simultanée, l'exécution parallèle et le partage de ressources entre des processus logiciels séparés dans le but de réaliser un ensemble de tâches et d'activités spécialisées. Ces processus logiciels, opérés explicitement par l'utilisateur ou implicitement contrôlés par le système permettent à l'utilisateur de réaliser des activités multiples et complexes de façon séquentielle.

■ Principes de Souplesse et de Robustesse

Pour Coutaz et Nigay [Coutaz 2001], dans l'architecture logicielle des systèmes interactifs, la notion d'utilisabilité de l'interaction est caractérisée par deux principes : la *souplesse* et la *robustesse*. « *La Souplesse (de l'interaction) exprim[ant] l'éventail des choix (pour l'utilisateur et le système) ; la Robustesse (de l'interaction) vis[ant] la prévention des erreurs, l'augmentation des chances de succès de l'utilisateur.* » Ces principes sont déclinés en propriétés, notamment concernant la souplesse : les propriétés de *non-préemption* (le but de l'utilisateur est directement atteignable, sans trajectoire contrainte) ; d'*interaction multifilaire* (capacité à permettre la réalisation « simultanée » de plusieurs tâches) ; de *multiplicité du rendu* ; d'*adaptabilité* (personnalisation du système sur intervention explicite de l'utilisateur) ; d'*adaptativité* (capacité du système à s'adapter sans intervention explicite de l'utilisateur) ; de *plasticité* (capacité du système à s'adapter aux variations de ressource attentionnelle et de contexte).

■ Supporter les activités complexes ?

Pour les GUI, nous pourrions postuler que ces principes d'utilisabilité sont respectés concernant le système d'exploitation lui-même et délégués aux concepteurs des applications pour chacune des instances logicielles ouvertes sur l'interface, avec le support important d'un cadre cohérent de styles et de services directement rendus par le GUI et/ou programmables (widgets, styles d'interaction, styles et moteurs de rendu graphiques, animations, etc.).

Néanmoins, et ceci a été souligné par les promoteurs de modèles Post-WIMP, cette architecture des interfaces graphiques ne favorise pas une programmation aisée, par les concepteurs, de nouveaux concepts interactifs ou une organisation plus « créative » des composants de l'interface. Ainsi, les classes des widgets fournis par la *toolkit* des GUI ne permettent souvent pas l'accès ou la transformation de fonctionnalités internes encodées de façon statique [Lecolinet 2003]. Plus important et du point de vue de l'utilisateur, si cette architecture logicielle fournit un cadre d'usage générique, sûr et performant, elle limite aussi des usages plus souples et des organisations ou programmations personnalisées de l'espace de travail. Plus particulièrement, elle restreint les interactions, connexions, ou planifications réalisables par l'utilisateur dans l'espace graphique du GUI, de façon explicite ou implicite, entre données, représentations et outils issus de ressources logicielles multiples. Ce dernier point réfère selon nous à une problématique de continuité. Il nous semble constituer un obstacle à l'utilisabilité de l'interface graphique utilisateur pour supporter des activités complexes.

4.1.2. GUI, des problèmes de continuités

Nous voulons ici relever, de façon préalable et non exhaustive, un ensemble de questions liées aux choix graphiques formés pour l'interface utilisateur des ordinateurs personnels. Plus précisément, nous avons cherché à identifier des principes ou aspects de l'architecture graphique des GUI, pouvant engendrer potentiellement des problèmes ou limitations d'usage pour l'utilisateur, et référant selon nous à une problématique de continuité.

4.1.2.1. Segmentations graphiques et problèmes de continuité

■ Opacité et fermeture visuelle des composants

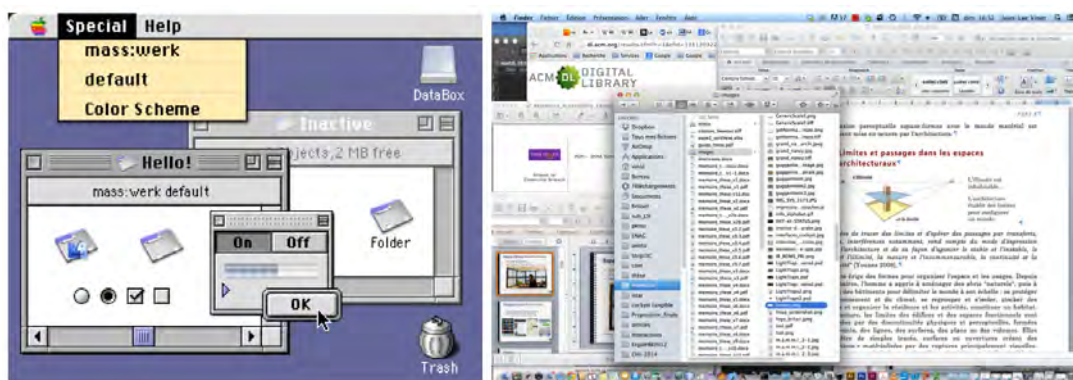


Figure 126 : Opacité et fermeture graphique des fenêtres, Mac OS 9 - 1999 (à gauche), Mac OS X 10.9.2 - 2013 (à droite).

La Figure 126 illustre l'une des conséquences les plus importantes pour le design graphique de l'interface des choix d'architecture logiciel fait par les concepteurs des GUI. Ces images d'écran, correspondent à deux interfaces graphiques des systèmes Mac OS : à gauche le GUI du Mac OS 9 date de 1999, à droite une version récente de l'interface système, Mac OS X 10.9.2. (Mavericks). Ces deux images écrans, bien que séparées de près de 25 ans, traduisent bien l'opacité et la fermeture graphique persistantes des objets containers de l'interface : des « mal nommées » *fenêtres* qui de fait, sont plus visuellement

et interactivement des « murs » d’affichage enclosant et isolant des processus logiciels et des *espaces fermés* d’activités ! Le concept de placement libre des fenêtres et donc leur superposition graphique a entraîné une « nécessité » de renforcement des contours, de mise en saillance visuelle du focus et d’opacité généralisée des fonds. Dans cet espace habituel d’usage, et même pour des activités complexes qui nécessitent l’usage simultané d’applications multiples, les limites/frontières des fenêtres sont davantage marquées et séparatrices que légères et « ouvertes ». Les passages et circulations, essentiels pour la conception architecturale (bâtiment), entre ces différents « lieux » réservés à l’écran, ne sont pas envisagés comme un préalable. Hors les accès visuels et de sélection préservés par l’utilisateur lui-même dans sa composition-empilage de fenêtres à l’écran. La notion de « porosité »¹ visuelle et interactive entre containers n’est pas envisagée, hors quelques usages de la transparence pour les fonds, les barres de titre ou les menus. Dans de tels *styles architecturaux*, la notion de continuité et de relation entre espaces et formes est fortement restreinte.

Les évolutions récentes des interfaces graphiques, comme le concept de tuiles applicatives (voir Figure 127 à droite) de l’interface Modern UI de Windows 8, ne remettent pas en cause, bien au contraire, cette approche segmentée et centrée application. L’interface de Windows 8 met en œuvre des idées intéressantes concernant la composition visuelle ou la plasticité comme l’adaptation sémantique des contenus de ces tuiles applicatives à la taille d’affichage. Néanmoins, le style graphique de type *Flat Design* de Windows 8 gomme visuellement les contours de fenêtres (cf. Figure 127 à gauche), ce qui peut paraître augmenter la continuité, mais sans répondre au problème de fermeture interactive (discontinuité) entre ces composants. Cet effacement des saillances graphiques et donc de la hiérarchisation visuelle des objets graphiques est peu adapté à l’utilisation de contenus complexes. Il ne permet pas à l’utilisateur, notamment pour la version desktop, de structurer efficacement son accès visuel à de trop nombreuses informations.

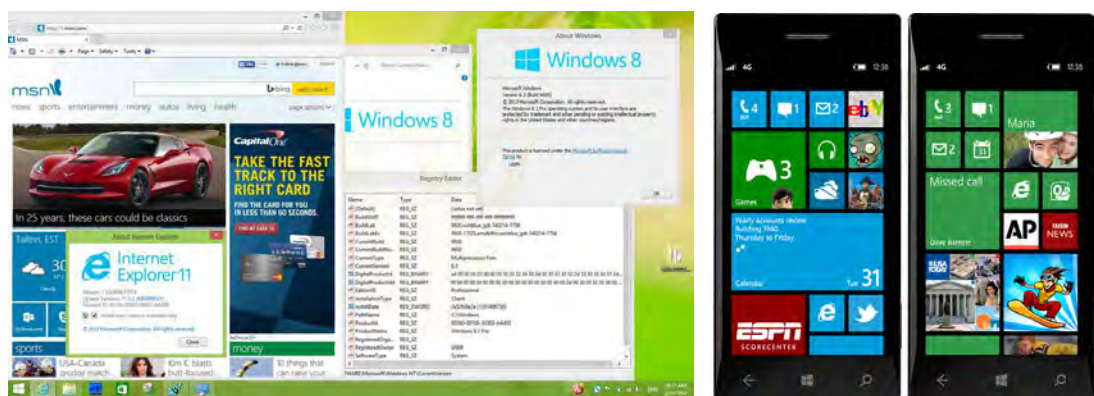


Figure 127 : Windows 8 Modern UI, mode desktop fenêtré du traditionnel GUI (à gauche), mode Smartphone basé sur une composition en tuiles (à droite)

■ Une approche graphique *Icône-Fenêtre* centrée application

Ces choix graphiques sont issus d’une approche de l’activité qui est restée fondamentalement centrée sur la notion d’application et sur le principe clef

1 la porosité en architecture et urbanisme, en opposition à l’étanchéité et à l’opacité, désigne l’aptitude du bâti à se laisser traverser par l’environnement, à permettre les relations, ou à laisser filtrer l’information.

d'une double représentation graphique Icône-Fenêtre des ressources, qui correspond à deux modes interactifs distincts. L'icône représente de façon abstraite un mode d'adressage, d'une action (réifiée) mais surtout d'un programme ou d'une ressource nommée (fichier, URL...) du système disponible localement ou sur le réseau. La fenêtre correspondant à un mode d'édition de cette ressource. Cette approche privilégie un usage séquentiel des données et outils, basé sur un paradigme d'ouverture — à l'écran — d'un état « intégral », « figuratif », éditable par une application logicielle dédiée au type de données, et visant à une exécution successive de tâches spécialisées. L'utilisateur est incité à sélectionner le service requis, rendu par l'intermédiaire de l'icône et/ou du label de nommage, souvent au sein d'une liste, pour l'ouvrir et l'afficher avec une taille importante à l'écran, dans une fenêtre dédiée. Il fermera ou non cette application-fenêtre pour permuter de tâche : ouverture d'une nouvelle fenêtre applicative; sélection d'une fenêtre déjà ouverte sur l'interface; édition de nouvelles données dans la fenêtre active. Il sélectionnera une icône, à partir du dock, des raccourcis, de la barre des tâches ou d'un fichier dans le Finder, pour ouvrir ou revenir à une autre fenêtre. Certaines applications proposent des espaces multi-pages, notamment sous la forme d'onglets, par exemple les browser Web, qui permettent d'ouvrir et de superposer plusieurs contextes et de naviguer plus rapidement entre eux. Dans le cadre d'un usage important de l'outil informatique pour instrumenter l'activité, par exemple professionnelle, des consultations ou interruptions régulières d'applications transversales (messagerie, navigateur Web, gestionnaire de fichiers) imposeront des basculements constants entre fenêtres. De fait, cette approche graphique centrée application a pour conséquence de forts basculements de l'affichage, une très forte discontinuité visuelle, et une segmentation de l'usage.

■ Absence de mécanisme simple de création, association, configuration...

Plus problématique encore est l'absence de mécanismes simples permettant à l'utilisateur de créer des relations structurées entre entités graphiques, applications, fenêtres ou objets graphiques affichés sur l'interface. La création de nouveaux objets génériques (formes, textes, connecteurs) ou de containers et composants graphiques de type widgets « vides », non encore reliés à une structure de fichiers ou de données, n'est pas possible. L'ouverture d'une fenêtre générique permettrait par exemple de créer un espace de type container (ou viewport) pour poser et composer librement, pour programmer et planifier visuellement, une activité à partir d'éléments graphiques de représentation ou de contrôles sur le modèle de données. Ainsi, avec Elastic Windows, Kandogan [Kandogan 1996] avait proposé d'augmenter l'espace de composition du GUI en réalisant des opérations sur un ensemble de fenêtres associées de façon hiérarchiques. De la même façon, sont irréalisables le dessin ou l'écriture libre sur des calques d'interface, ou la création de connecteurs graphiques entre entités de différents processus. Enfin, le simple enregistrement d'une « composition » de l'écran, sauvegardant l'état des fenêtres, transformations et données affichées, et rappelable par l'utilisateur (continuations) est limité et plutôt réservé à une reprise après erreur de certaines applications.

■ Approche orientée Document : une alternative ?

D'autres approches existent pourtant, et notamment l'approche centrée document. Ainsi, OpenDoc [Curbow 1997] développé par Apple en collaboration

avec Novell et IBM (1995), proposait un nouveau paradigme utilisateur et une approche centrée création de document. Un document OpenDoc était un framework orienté objet qui composait, en fonction des besoins utilisateur, des éléments (parties) spécialisés — traitement de texte, image, tableur... — mais dont toutes les parties continuaient à être pleinement éditables (cf. Figure 128 à droite). Chaque document était composé d'une ou plusieurs parties, la première ou partie racine définissait les propriétés globales du document. L'utilisateur pouvait créer ou incorporer les parties qu'il souhaite, par exemple par un Drag & Drop de parties existantes. Les parties elles-mêmes incluaient un contenu intrinsèque (dont les propriétés avaient été définies par le développeur du composant) mais pouvaient aussi incorporer un autre type de composant. Des bibliothèques spécialisées étaient chargées dynamiquement avec l'inclusion d'un nouveau modèle de composant. Les exigences définies par le projet intégraient la capacité pour l'utilisateur de changer à tout moment, la forme, l'apparence ou les propriétés graphiques des parties et des contenus. Un modèle du document OpenDoc était représenté sous la forme d'un graphe de scène, et un ensemble de vues spécialisées permettaient d'ajouter des composants, de visualiser, d'éditer ou de modifier la structure (cf. Figure 128 à gauche). Le développement des composants (Live Objects), était néanmoins compliqué et OpenDoc sera abandonné par Apple avec l'arrivée de Mac OS 9.

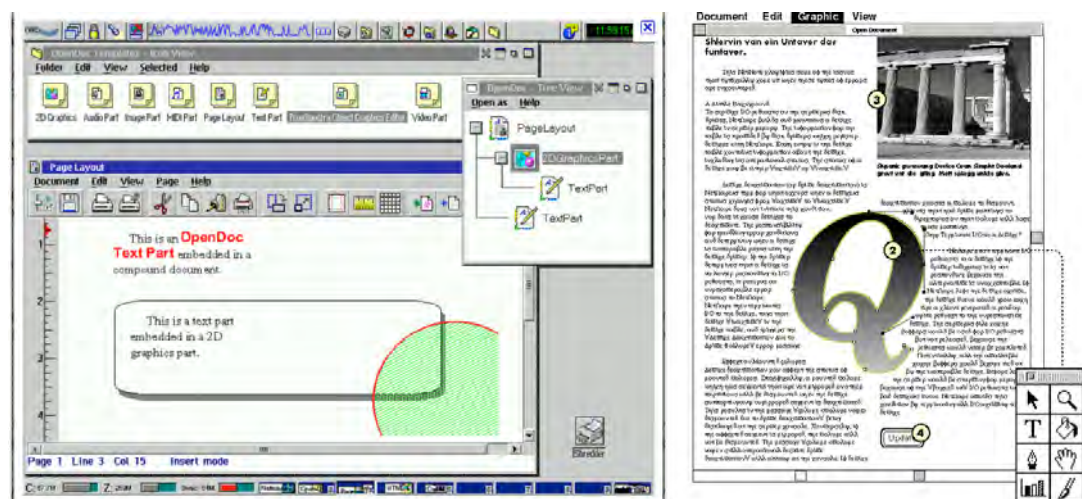


Figure 128 : OpenDoc une plate-forme logicielle pour l'édition de documents composites, vues spécialisées : templates, scenegraph, page layout (à gauche), édition d'un objet vectoriel d'habillage d'un document composite (à droite)

4.1.2.2. Hétérogénéité spatiale et de représentation et problèmes de continuité graphique

■ Non-consistance géométrique de l'espace du GUI

L'espace de rendu 2D de l'interface graphique utilisateur, tel que perçu par l'utilisateur, résulte de la mise en œuvre d'un « style » particulier au système avec un ensemble de principes visuels, de propriétés graphiques et de comportements spécifiques. Notamment, la compréhension par celui-ci de la nature et de l'usage possible de cet espace interactif est fondée sur son expérience des propriétés plastiques et des comportements géométriques des objets qu'il manipule au sein du dispositif d'affichage. Concernant l'architecture de la scène graphique, coexistent généralement deux niveaux (deux logiques) graphiques distincts : un espace de rendu « écran », orienté pixel, qui permet de former et

composer graphiquement les widgets système (gérés par le Windows Manager), notamment des objets container ; des espaces « de contenu » internes à ces containers et orientés données, permettant d'afficher de façon spécifique les contenus très divers de fenêtres, vues ou pages. Cet espace visuel interactif des GUI n'est pas géométriquement homogène.

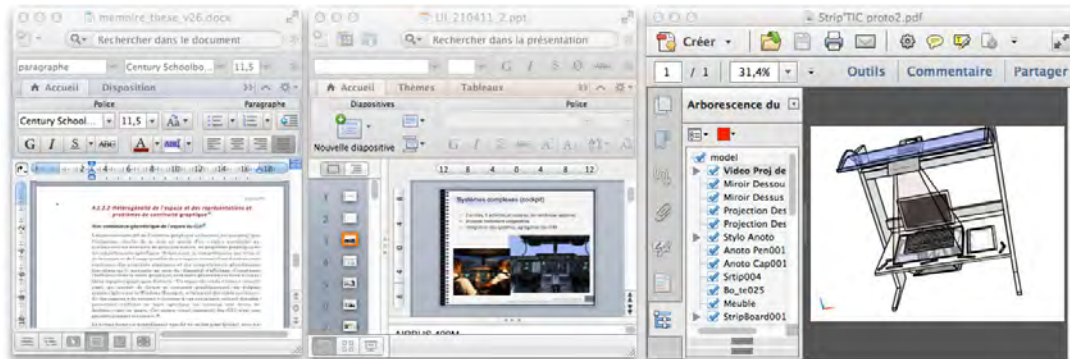


Figure 129 : Deux modalités d'affichage et de transformations dans l'espace GUI, espace écran orienté pixel et rigidité graphique pour les widgets système, et espace contenu orienté données avec vue transformable par l'utilisateur

Le niveau écran est généralement spécifié en unités pixel (entier), avec un espace de coordonnées (x, y) relatives au coin haut-gauche de l'écran (0,0). Les objets graphiques de cet espace écran, fenêtres elles-mêmes mais aussi décorations, en-têtes ou widgets de contrôle de ces fenêtres, menu système, barre de tâches ou dock, icônes... sont alignés sur la grille de pixels et essentiellement statiques (cf. Figure 129 les éléments graphiques statiques des widgets). La modification par l'utilisateur de leur forme, composition, ou transformation, est très limitée : redimensionnement des fenêtres mais pas de mise à l'échelle s'appliquant de façon homogène à l'ensemble du composant, translation contrainte souvent limitée à l'écran étendu (pas de notion d'espace librement extensible par l'utilisateur ni de *pan* de l'espace d'affichage lui-même), pas de rotation contrôlable des composants. Les transformations sur l'axe « z » (profondeur) des fenêtres sont réduites à une seule mise au premier plan automatique de la fenêtre sélectionnée.

Les transformations géométriques possibles des contenus par l'utilisateur sont de nature différentes et adaptées au type de contenu. La présentation de ces contenus au sein d'un objet container (ex. fenêtre) renvoie généralement à la notion de viewport, une région géométriquement délimitée clippant l'affichage d'un contenu textuel, 2D ou 3D (voir Figure 129 les contenus transformés des 3 fenêtres). L'espace de représentation du contenu qui réfère à son propre système de coordonnées et de transformation, est indépendant de celui du viewport. L'utilisateur peut interagir pour se déplacer dans l'espace du contenu, ou plutôt modifier la transformation géométrique du contenu pour changer le point de vue et la partie de celui-ci qui sera visible à travers la « fenêtre » de vision du viewport. Il peut choisir le niveau de zoom de l'affichage ou faire défiler le texte visible d'un fichier Word, naviguer au sein d'une scène 3D en manipulant de façon continue les axes de transformation. Ce contenu avec sa transformation courante, est projeté dans l'espace local de coordonnées du container et clippé aux limites de la vue (viewport), puis transformé dans l'espace de coordonnées écran, et finalement rasterisé en pixels à afficher à l'écran. Dans ces espaces internes, et en fonction du type de contenu, l'utilisateur aura ainsi la possibilité de contrôler de façon continue la vue par un ensemble homogène de transformations 2D ou 3D.

De fait, et malgré l'évolution des capacités d'affichage, avec des résolutions d'affichage dépassant les 300 DPI ou la nature 3D des moteurs graphiques actuels, coexistent encore deux modèles graphiques assez hétérogènes. La résolution permettrait aujourd'hui d'envisager des niveaux de zoom contrôlables pour les fenêtres entières (décorations comprises) pour permettre un meilleur compromis entre maintien de l'accès visuel et gain de place à l'écran. L'utilisation adéquate de transformations géométriques 3D comme avec *Métisse* [Chapuis 2005] pourrait aussi permettre de mieux structurer visuellement les vues et ressources sur une scène complexe.

■ Discontinuité métrique de la dimension en « Z » des interfaces 2D

Avec la notion de superposition/recouvrement des fenêtres (métaphore des feuilles de papier) était apparue une coordonnée supplémentaire de « hauteur d'empilement » : le « z-index », permettant de gérer l'ordre de dessin à l'écran et l'occultation éventuelle des fenêtres inférieures par les fenêtres supérieures. Cette dimension verticale se limite encore à un simple index de pile, avec une expression graphique minimale pour l'utilisateur d'une perception « ordinale » de la profondeur d'affichage, produite par l'effet d'occultation des composants (opaques) situés au premier plan et renforcée par quelques marqueurs graphiques comme l'ombrage. Contrairement au modèle du « monde réel », où des repères géométriques (perspective), lumineux ou visuels (par exemple l'éclaircissement et la désaturation progressive des couleurs avec la distance), permettent d'estimer visuellement les distances relatives de profondeur, la traduction graphique du z-index dans les GUI ne permet pas de construire une image mentale cohérente de la profondeur de scène. Il n'existe pas de véritable coordonnée Z, géométriquement transformable, contrôlable par l'utilisateur et permettant par exemple de grouper en couches les composants dans l'« épaisseur » d'un espace de représentation.

■ Problèmes de conformité et de saillance des représentations visuelles

La Figure 130 présente trois représentations d'un même document texte sur l'interface graphique. Les deux premières représentent le fichier au sein du système de fichier tel que rendu par le Finder du Mac OS X : en mode *liste* avec un label du nom de fichier précédé d'une icône générique de type (ici un type PDF), et en mode *icônes* présentant une miniature du document et un label. La troisième correspond à une vue WYSIWYG d'une partie du document dans Acrobat.

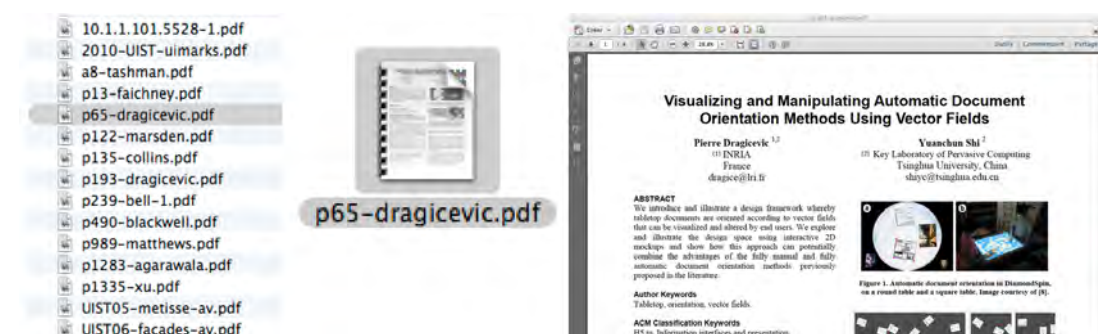


Figure 130 : Représentations abstraites et mode vignette dans le Finder, et mode WYSIWYG avec Acrobat, d'un même document texte

Ces modes visuels de représentation fichier-document sont assez semblables sur les différentes interfaces graphiques. Dans cet exemple, et malgré la

nature du fichier (PDF) favorisant une représentation visuelle conforme (facilement zoomable), la nature même de l'objet manipulé n'est pas homogène. L'abstraction visuelle des objets liste représente l'adressage du fichier système (représentation d'un objet principalement textuel avec un symbole générique de type). La concrétisation WYSIWYG renvoie au document lui-même, avec un mode édition (représentation réaliste d'une identité spécifique). La vignette intermédiaire est un compromis entre abstraction et figuration qui facilite l'identification visuelle du document, mais qui n'est pas transformable de façon individuelle pour fournir une continuation visuelle avec le mode édition.

D'autre part, l'affichage d'objets de représentation symbolique des fichiers sur l'interface, est peu associé à des mécanismes ou feedbacks de mise en saillance, implicites (générés par le système) ou explicites (contrôlés par l'utilisateur). Ces items graphiques sont pourtant souvent visualisés par l'utilisateur sous la forme de listes pouvant contenir de très nombreux éléments. La formulation d'indices visuels, par exemple permettant de percevoir l'utilisation passée ou fréquente des fichiers, ou de les particulariser, organiser ou regrouper librement, permettrait de mieux structurer visuellement l'interface et de renforcer la continuité d'usage.

■ Discontinuités et continuités graphiques et continuité de l'usage

Ces problèmes d'hétérogénéité spatiale de l'interface, de conformité visuelle et d'absence de saillances graphiques ne sont pas sans rappeler les questions de continuité-discontinuité traitées dans la deuxième partie de ce mémoire et concernant la conception typographique (cf. partie 2). De la même façon, des insuffisances de *continuités* graphiques des structures, mais également des manques de *discontinuités* entre formes semblent impacter la « lisibilité » et la continuité d'usage de l'interface.

4.1.2.3. Opacité des structures et problèmes de continuité interactive

■ Opacité des contenus et des propriétés

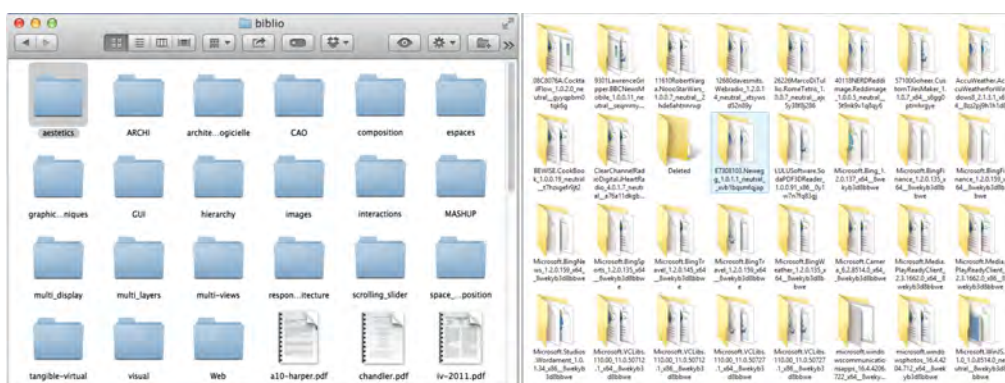


Figure 131 : Représentation de type iconique des fichiers répertoires avec le Finder Mac OS X (à gauche), avec Windows File Explorer (à droite)

La Figure 131 illustre la représentation des répertoires dans les gestionnaires de fichiers des systèmes Mac OS X (à gauche) et Windows 8 (à droite). Ces représentations de type iconique sont visuellement peu explicites sur les propriétés et contenus des répertoires, notamment celui du Finder Mac qui présente un visuel générique, que le répertoire soit vide ou qu'il contienne de nombreux fichiers. La représentation du File Explorer de Windows montre

davantage de ce contenu (vide ou icônes de fichier type), mais cette représentation hiérarchique reste assez limitée. La possibilité pour l'utilisateur de visualiser, ou même d'accéder dynamiquement aux informations (propriétés de taille ou nombre de fichiers contenus, profondeur hiérarchique, nature des contenus) est elle aussi très réduite. Des filtres permettent néanmoins d'organiser ces fichiers par exemple par date, nom, taille, tags... voire de les regrouper sous forme de sections, ou même de piles sous Mac Os X.

■ Discontinuité de navigation dans les structures ?

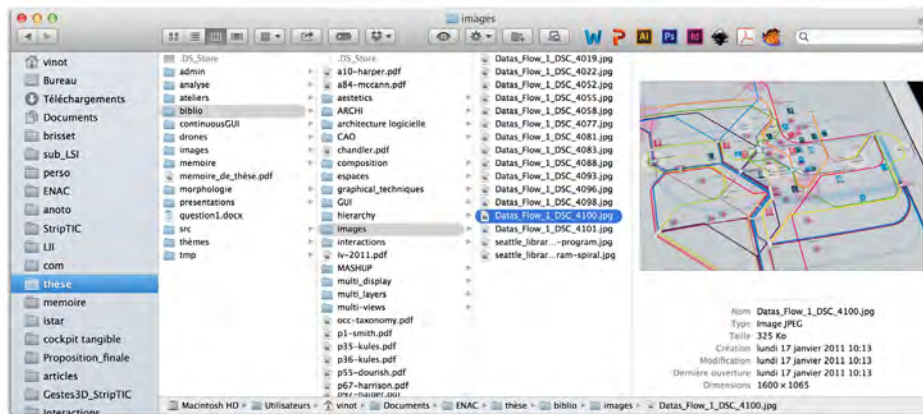


Figure 132 : Représentation mode « colonne » dans le Finder avec une double vue hiérarchique du chemin d'accès (colonnes + barre chemin d'accès)

La Figure 132 montre la représentation en colonnes d'une hiérarchie de fichiers offerte par le Finder Mac. Elle illustre deux designs existants de parcours continu des arborescences dans les interfaces de gestion de fichier des principaux OS des ordinateurs personnels. Une présentation en colonne du parcours permet de créer une nouvelle colonne de contenu, fichiers du répertoire ou information sur le fichier de données avec par exemple la visualisation et les propriétés du fichier image sélectionné (cf. colonne à droite de la Figure 132), et la mise en saillance des nœuds parents. Une représentation spécifique du chemin complet d'adressage du fichier, la barre de chemin d'accès (en bas sur la figure), permet également de réifier les noeuds de ce chemin et de permettre à l'utilisateur de naviguer vers un répertoire quelconque du chemin (comme avec le chemin de l'adresse du fichier dans le File Explorer de Windows). Ces fonctionnalités présentes aujourd'hui dans de nombreux OS sont issues d'améliorations progressives, parfois issues de travaux de recherche de la communauté IHM (voir section état de l'art).

Néanmoins, de simples mécanismes d'exploration dynamique (par exemple de visualisation « directe » des contenus) ou de visualisations alternatives préservant le contexte global font défaut. Comme manque la possibilité de composer des vues sur des modèles hiérarchiques différents de ceux du système de fichiers et définis par l'utilisateur, par exemple étendant le système de tags. Hors l'usage de favoris ou de filtres de recherche, la réouverture de fenêtres applicatives ramène l'utilisateur à une racine par défaut de l'arborescence. Seul l'usage de menu comme celui des dossiers récents permet de naviguer dans l'historique des visualisations. La sauvegarde de configuration « écran », enregistrant le contexte d'usage, la composition et l'état courant des applications ouvertes, est impossible.

Plus largement, les mécanismes permettant la navigation spatiale ou temporelle dans les structures de l'interface sont limités. Ainsi, la fonction

d'Undo-Redo est locale, non généralisée, et dépendante de l'application, même si des travaux récents [Appert 2012] ont proposé des espaces de solutions ; les mécanismes de navigation entre applications ou fenêtres se limitent principalement à une sélection par « *switch* » ou à l'utilisation de la barre des tâches.

■ Absence de mécanismes de programmation

Ces derniers exemples réfèrent à l'impossibilité pour l'utilisateur de facilement programmer son interface graphique pour mieux l'adapter à son usage spécifique, pour planifier ses tâches, ou pour externaliser ses fonctions cognitives. Manque ainsi des fonctionnalités comme : la notation libre au dessus ou liée aux fenêtres applicatives et au plan de travail ; la pose libre de marqueurs visuels sur les structures existantes ou de raccourcis d'action ; l'enregistrement de configurations de l'interface, comme une copie de l'état actuel permettant des continuations interactives ; la création de containers vides pouvant regrouper un ensemble de ressources...

4.2. État de l'art : apports pour un concept de continuité

De très nombreux travaux et publications de l'interaction Homme-Machine, ont interrogé ces problèmes d'utilisabilité ou « insuffisances » des interfaces graphiques. Intégrés progressivement par les équipes design des principaux OS, leurs idées et résultats ont contribué à faire évoluer de façon considérable les interfaces graphiques vers un environnement d'interaction « WIMP++ », conservant une structure assez similaire avec des fenêtres d'application, de très nombreuses icônes, un mécanisme de pointage étendu supportant les pointeurs multiples, mais aussi une forte diversification des modalités et technologie d'entrée.

Une partie de ces travaux a plus spécifiquement apporté des contributions que nous pouvons associer au concept de continuité et qui relèvent de questions graphiques intéressant notre problématique. Nous présentons ici ces travaux de recherche, qui constituent selon nous des apports au concept de continuité pour les interfaces graphiques utilisateur, en les structurant en classes d'usage pour la continuité.

4.2.1. Apports de travaux IHM que nous associons au concept de continuité

4.2.1.1. Continuité architecturale et plasticité de l'espace interactif

4.2.1.1.1. 2D+ : nouvelles géométries pour l'interface graphique

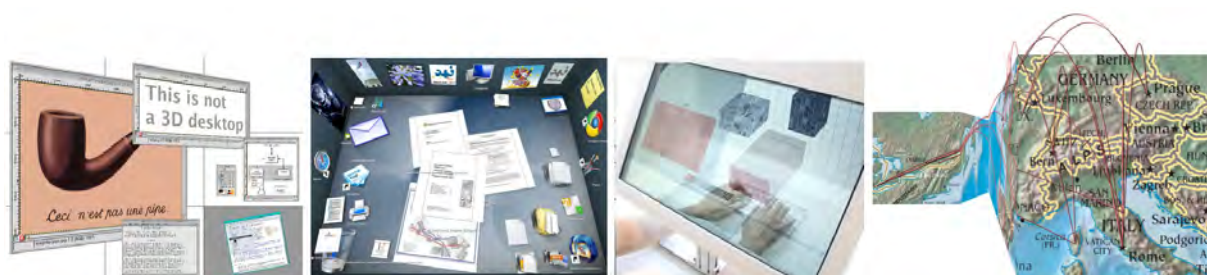


Figure 133 : Réinventer l'espace graphique 2D du GUI,
de gauche à droite : *Metisse*, *BumpTop*, *SpaceTop* et *Mélange*

De nombreux travaux ont proposé de réinventer l'espace interactif du GUI par un dépassement des principes WIMP de composition 2D de l'interface. Certains d'entre eux, ont notamment utilisé les capacités des moteurs et modèles graphiques 3D, pour augmenter l'appropriation par l'utilisateur de son espace de travail tout en préservant un modèle de représentation essentiellement symbolique. Ces nouvelles géométries favorisent la perception par l'utilisateur d'un espace visuel et d'interaction continue, se « comportant » de façon plus homogène avec le modèle physique.

Ainsi *Metisse* [Chapuis 2005] tire pleinement parti des capacités OpenGL pour augmenter les fonctionnalités graphiques et d'interaction du Windows Manager (cf. Figure 133 à gauche). Par exemple pour transformer librement et de façon continue les fenêtres et leurs contenus sur l'interface, ou composer librement des interacteurs issus d'applications différentes. Le titre même de l'article insiste sur le fait que *Metisse n'est pas un bureau 3D*.

BumpTop [Agarawala 2006] s'inspire du comportement physique des objets réels pour gérer la densité graphique, transmettre plus d'information et rendre plus *réaliste* l'interaction (cf. Figure 133 centre-gauche). Outre l'usage d'une représentation 3D renforçant la continuité de l'espace interactif, l'implémentation de *piles* offre une forte continuité de structure. En effet, ce concept de piles permet à l'utilisateur d'associer et de manipuler librement un ensemble d'objets graphiques, avec des compositions d'ouverture continues de type *fish-eye*, *livre*, *tas*, *grille* ou *éventail*.

SpaceTop [Lee 2013], propose de fusionner par transparence une représentation 2D traditionnelle du GUI avec une vue 3D permettant de manipuler les objets de l'interface (cf. Figure 133 centre-droite). Le dispositif capture et restitue à l'écran les mains de l'utilisateur placées à l'arrière de l'écran et associe ses gestes (ex. *pinch*) à des événements d'interaction avec les représentations 3D des objets d'interface. Cette vision « à travers » l'écran de la structure et des mains offre une forte continuité d'accès, visuel et interactif à ces structures.

Mélange (Space Folding) [Elmqvist 2008] (cf. Figure 133 à droite) propose une nouvelle technique de distorsion graphique en plis pour augmenter l'affichage à l'écran. Les *plis* réalisés sur l'espace de représentation garantissent une vue plus continue et plus complète de l'information, avec une visualisation de type *Zoom+Context*.

Local layering [McCann 2009] présente un mécanisme intéressant d'interpénétration visuelle d'éléments graphiques appartenant à des couches graphiques différentes superposées (dans le sens du modèle de graphe de scène), pour le rendu 2D mais aussi pour l'image animée.

4.2.1.1.2. Composition de structures graphiques interactives

Faciliter la création par les concepteurs ou les utilisateurs de composants interactifs complexes ou personnalisés, à partir d'une composition d'éléments simples ou d'un assemblage par copie d'éléments existants, permet de dépasser l'opacité et la rigidité des structures graphiques du GUI et de favoriser la personnalisation de l'interface et une continuité de l'accès à des informations, ressources ou services multiples.

Le modèle *Ubit* [Lecolinet 2003] expose une architecture modulaire pour les GUI, basée sur une approche de type graphe de scène. La composition de *Brickgets*, eux-mêmes composés de briques élémentaires, de comportement, de propriétés graphiques, d'éléments et de *callbacks*, permet la réalisation de composants interactifs complexes.

Basé sur *Metisse*, *Façades* [Stuerzlinger 2006] permet à l'utilisateur final, de composer simplement des *découpages* de composants interactifs issus d'applications multiples, d'enregistrer cette composition sous la forme d'une application, et de gérer cette nouvelle fenêtre au travers le Window Manager. *Façades* permet également de modifier l'interface d'applications existantes ou de remplacer des widgets standards du GUI par la création de widgets personnalisés.

Le concept de « Mashup » [Wong 2008], principalement développé pour les environnements Web ou mobiles, fournit un ensemble de services permettant l'agrégation, la composition, la personnalisation ou la supervision de sources ou applications multiples. VisMashup [Santos 2009] fournit un framework pour la création d'applications de visualisation personnalisées.

4.2.1.2. Par-delà la segmentation logicielle : construire de la continuité d'usage

4.2.1.2.1. Association de fenêtres et connexions entre applications

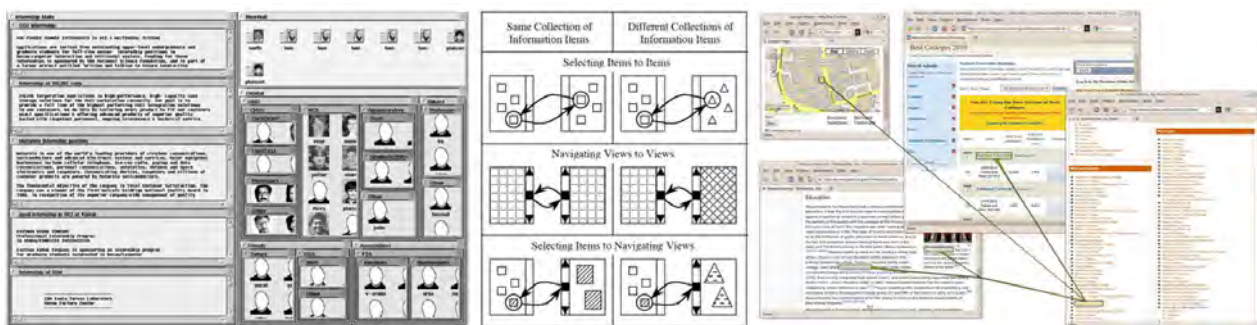


Figure 134 : *Elastic Windows* - 1996 (à gauche), *Multiple Windows Coordinations* 1998 (au centre), *Visual Link across Applications* - 2010 (à droite).

Des notions telles que le groupement, l'association, ou l'établissement de liens visuels entre fenêtres applicatives sont indispensables pour dépasser le cloisonnement des composants dans les GUI, et permettre l'interaction ou la connexion entre données de processus et de fenêtres séparés. Cette mise en relation graphique et des modèles de données, par-delà les limites applicatives, est essentielle à la continuité d'usage des espaces interactifs.

Elastic Windows [Kandogan 1996] (cf. Figure 134 à gauche), est basé sur trois principes : une organisation hiérarchique des fenêtres, une composition en tuiles de l'espace d'affichage et l'application d'opérations sur des groupes de fenêtres à n'importe quel niveau de la hiérarchie. Ces opérations peuvent être par exemple de composition, de redimensionnement.

North et Shneiderman proposent une Taxonomie [North 1998] (cf. Figure 134 au centre) à destination des designers d'interfaces pour dépasser l'indépendance des fenêtres applicatives et permettre une coordination entre ces

fenêtres. Avec *Snap-Together Visualization* [North 2000], ils fournissent un modèle et une API pour cette coordination.

Visual Link [Waldner 2010] entend répondre à l'accroissement de la complexité des tâches et à la nécessité de mettre en relation les informations entre applications. Visual Link met en saillance et connecte visuellement les liens possibles entre données affichées (enregistrées sous forme de collections de région de sélection) d'une fenêtre source et de fenêtres clientes (cf. Figure 134 à droite).

4.2.1.2.2. Mécanismes de navigation et continuités d'interaction et d'usage

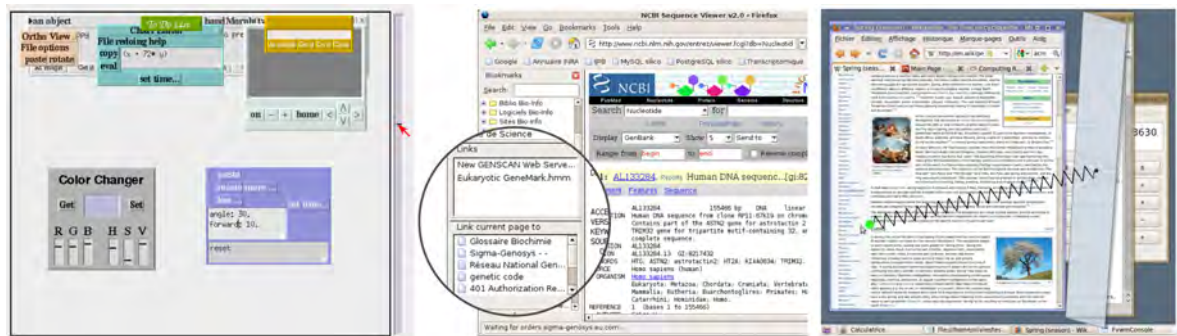


Figure 135 : *Generalized and Stationary Scrolling*, 1999 (à gauche), *PageLinker*, 2007 (au centre), *Dwell-and-Spring*, 2012 (à droite).

Dans un contexte d'activités multiples et d'interfaces utilisateur basées sur les applications ou pages, avec des fenêtres logicielles cloisonnées et superposées ou des permutations de pages... les mécanismes de navigation, dans l'espace d'affichage, dans l'historique de l'activité ou entre activités et processus, sont un enjeu essentiel pour permettre une continuité de l'usage. De nombreux travaux de recherche mais aussi le développement de fonctions et d'outils intégrés aux principaux systèmes d'exploitation ont adressé ce besoin comme des « palliatifs » au principe de cloisonnement des processus logiciels.

« *Generalized and Stationary Scrolling* » publié à UIST'99 [Smith 1999], présente une généralisation du concept de scrolling. L'idée est de répondre à la superposition à l'écran de trop nombreux composants graphiques par une notion de composition et de filtrage généralisé par l'utilisateur, de la saillance des objets graphiques, en agissant (scrollant) à partir de coordonnées affectées à de multiples dimensions ou paramètres de propriétés non spatiales des composants (cf. Figure 135 à gauche).

Un autre exemple de généralisation d'une fonctionnalité commune des logiciels interactifs concerne le mécanisme d'Undo-Redo. *Dwell-and-Spring* [Appert 2012] propose ainsi un mécanisme d'interaction directe pour la navigation dans l'historique de manipulation des objets de l'interface. L'utilisateur peut très simplement abandonner une action engagée ou annuler un déplacement, revenir à une position antérieure de scrolling d'un document, annuler le redimensionnement d'une fenêtre ou naviguer de façon temporaire entre deux fenêtres superposées (cf. Figure 135 à droite). Surtout l'historique propre à chaque objet permet des interactions intermédiaires temporaires sur un objet pour modifier un autre objet puis annuler l'action intermédiaire.

Concernant également les techniques d'interaction, *OrthoZoom* [Appert 2006] propose un scrolling augmenté pour faciliter la navigation et l'acqui-

sition de cible dans les espaces 1D de données. La technique de navigation multi-échelle permet de sélectionner une cible précise dans un large espace de données en utilisant une interaction Pan&Zoom continue. La dimension orthogonale permet à l'utilisateur de définir le niveau de zoom pour ajuster le niveau de précision du scrolling et naviguer plus rapidement dans la globalité du contexte ou de la hiérarchie.

WindowScape [Tashman 2012] fournit un *Window Manager zoomable* pour faciliter la navigation entre les fenêtres. Basé sur la notion de groupement implicite et explicite des fenêtres, WindowScape propose de gérer la composition à l'écran par un mode supplémentaire de semi-réduction en vignettes visuelles des fenêtres, et par un groupement (composition) en colonnes des fenêtres, mais surtout d'aider la navigation à partir de deux interfaces dédiées : une interface de type timeline orientée historique de l'usage et une interface de type bookmark orienté Tags.

La notion d'interfaces réflexives, développée par Tabard dans son travail de thèse [Tabard 2009], propose une meilleure appropriation par les utilisateurs de leur propre activité et des données manipulées grâce à la capture et à la représentation de leurs historiques d'interaction. Par exemple PageLinker [Tabard 2007] (cf. Figure 135 au centre) est une extension pour les browsers Web permettant une navigation contextualisée avec des liens connexes créés de façon implicite et explicite par l'action de l'utilisateur.

4.2.1.2.3. Annotations libres ou « dissolution des fenêtres »

Réaliser de simples tracés ou annotations textuelles dans ou sur l'espace d'affichage ou sur des calques dédiés, de façon libre mais aussi associé géométriquement à des objets existants, peut permettre à l'utilisateur de s'affranchir de la segmentation des composants et des limites d'une composition très statique de l'interface pour renforcer la continuité de l'espace interactif.

Translucent Patches [Kramer 1994], déclare dès le sous-titre de l'article son intention de « dissoudre les fenêtres ». L'auteur propose, à l'image des structures libres et coopératives de notation sur papier ou tableau, de remplacer les fenêtres rectangulaires et opaques par des *patches* transparents et non rectangulaires de notation (texte et tracés) mais surtout de définition de zones associées à un tracé de contour d'englobement, de sélection ou d'association. Ces patches sont créés, élargis, compressés, supprimés, effacés, associés, « dissous » (intégrés en un ensemble de *marks*)... par des tracés gestuels. Ils sont associés à des classes de contenus ou d'*interprétation* (par exemple textuels), à des niveaux de transparence et à des *régions* d'intersection à l'écran.

Dizi [Agrawala 2005] est une interface d'annotation de document. Basé sur la notion d'encre numérique et d'annotation basée-papier, il permet à l'utilisateur de zoomer des parties de document (de type Zoom+Context) pour écrire librement et confortablement ses notes. Des mécanismes spécifiques de navigation permettent de se déplacer entre notes, de déplacer le document sous la note en cours ou même d'étendre l'espace du document rendant possible un « débordement » des notes.

ScreenCrayons [Olsen 2004] propose un système générique d'annotations pour n'importe quel type de document ou application. Le système est basé sur la capture image d'une zone d'écran, qui sera annotée librement avec un crayon numérique (avec des tags de couleurs) ou par des entrées textuelles.

L'utilisateur peut sélectionner des régions, les filtrer ou les mettre en évidence (masques), les surligner ou les entourer (barres latérales) et ceci de façon hiérarchique. Il pourra ensuite parcourir ces notes de façon hiérarchique. Le système les affichant avec des transitions animées.

4.2.1.2.4. Repenser l'espace

Enfin, un ensemble de travaux s'est intéressé de façon plus conceptuelle à la nature et à l'utilisation de l'espace lui-même, agencement de l'espace de travail, espace d'externalisation cognitive, position et rôle de l'utilisateur.

Dans *The intelligent use of space* [Kirsh 1995], Kirsh étudie comment nous utilisons l'espace ou gérons les arrangements spatiaux pour externaliser des fonctions cognitives comme la mémoire, construire nos représentations internes, simplifier notre perception, simplifier nos raisonnements et nos choix, aider le calcul, construire des espaces de solution, préparer; programmer et planifier nos actions... Au cours du projet de recherche Strip'TIC concernant les interfaces tangibles pour les contrôleurs aériens (voir partie 3 et sections 3.4.2 et 3.4.3), l'importance de cette utilisation de l'espace a été particulièrement évidente.

Dans leur article « Re-Place-ing Space » [Harrison 1996] Harrison et Dourish questionnent les termes de *Place* et d'*Espace*. Ils proposent de distinguer les concepts et leur rôle dans les systèmes collaboratifs en mettant en avant la meilleure adéquation du concept de *Place*. Ce concept, emprunté à l'architecture et à l'urbanisme, renvoie à la nature profonde culturelle et d'usage, plutôt qu'au bâti physique. Nous sommes situés dans l'*espace* mais nous agissons à/ dans une *place*. La *Place* étant un espace augmenté d'un sens social, d'une compréhension «culturelle» de son rôle, de sa fonction et de sa nature. Ces sens de la *Place* transformant l'*espace*. Pour les designers des systèmes interactifs, concevoir une *Place* devrait donc refléter cet arrangement conscient des éléments, propre à créer un espace qui accueille l'activité et permette d'exprimer les valeurs des occupants et de leur communauté. Cet article sera prolongé dix ans plus tard [Dourish 2006] par un rééquilibrage du concept au profit de l'espace.

4.2.1.3. Continuités des visualisations et des représentations

4.2.1.3.1. Techniques de visualisations et représentations continues



Figure 136 : Illustrations de techniques de visualisations.
Hyperbolic tree - T. Munzner (à gauche), *Treemaps* - J.D. Fekete (au centre),
Information landscape - M. Eyl (à droite).

La gestion, la visualisation et l'accès à l'information sur l'interface sont fondateurs de nombreux travaux concernant à la fois la visualisation graphique des données et les transformations géométriques des espaces de représentation. Ces travaux qui ont proposé des modèles, méthodes et techniques de visualisation ont notamment concerné la continuité d'exploration et de parcours sémantique des données dans des vues et espaces de rendu continu des données.

Ainsi Katifori et Halatsis ont fourni une ontologie des techniques de visualisation [Katifori 2007]. L'état de l'art de ces techniques est structuré selon six types de visualisation : listes hiérarchiques comme *Protégé* [Noy 2000], graphes 2D ou 3D comme *IsaViz* [Pietriga 2002], visualisations zoomables comme *Grokker* [Rivadeneira 2003], *Space filling* comme les TreeMaps [Scheiderman 1992], distorsions *Focus+Context* comme 3D Hyperbolic Tree [Munzner 1998], et espaces « paysages » d'information 3D comme *Harmony Information Landscape* [Eyl 1995]. Les auteurs, sur la base de cette ontologie, analysent les tâches supportées par ces techniques et comparent leur pertinence sur des questions telles que 2D vs 3D, les aspects navigation et interaction, ou les problèmes de passage à l'échelle.

Les concepts et techniques qui permettent à l'utilisateur une exploration détaillée des données tout en préservant l'affichage et l'accès au contexte sont tout particulièrement adaptés à notre problématique. L'article « revue » de Coburn et al. [Coburn 2008] analyse et évalue trois grandes catégories de design : *Overview+detail*, *Zooming* et *Focus+Context*. Les interfaces de type *Overview+detail* présentant simultanément deux vues séparées, une vue globale du contexte et une vue de détail ou augmentée comme les *Toolglass* [Bier 1993], d'une partie sélectionnée du contexte (par exemple l'affichage latéral de vues miniatures des pages d'un document à côté de la vue page en cours d'édition). La deuxième catégorie *Zooming* implique une séparation temporelle, la modification interactive de niveau de zoom n'affichant qu'une seule instance à la fois. De nombreuses toolkits ont été développées pour faciliter la conception d'interfaces zoomable comme Pad++ [Berderson 1996] ou plus récemment ZVTM [Pietriga 2005]. La troisième catégorie, *Focus+Context* intègre, dans le même temps et sur la même représentation, une vision globale du contexte et une vision locale de sélection. Les représentations déformées de type Perspective Wall [Mackinlay 1991] ou *fisheye* comme les Fisheye Menus [Bederson 2000] ont conduit à la notion d'*Expanding Target* utilisée pour l'effet *génie* du Dock du Mac Os X et étudiée par [McGuffin 2002].

4.2.1.3.2. Continuités graphiques et interactives et transitions visuelles



Figure 137 : Artistic Resizing (à gauche), Video Browsing (au centre),
Transitions visuelles différenciées (à droite).

Concernant la continuité graphique un ensemble de travaux, techniques graphiques et styles d'interaction ont été proposés pour renforcer la plasticité

graphique, la lisibilité de l'interface ou le contrôle interactif des représentations par l'utilisateur.

Artistic Resizing [Dragicevic 2005] (cf. Figure 137 à gauche) propose une adaptation visuelle et sémantique des interfaces au redimensionnement par une transformation continue entre des images clefs de spécifications vectorielles des objets de l'interface. Cette technique est utilisable de façon récursive pour des structures graphiques complexes.

Le concept de *transitions visuelles différenciées* [Schlienger 2006] (cf. Figure 137 à droite) fournit un moyen de coder de l'information dans les transitions en typant l'animation des trajectoires. Les transitions différenciées permettent ainsi de caractériser visuellement l'objet ou la nature de l'objet animée par son comportement, mais aussi de renforcer pour l'utilisateur la cohérence de sens de l'objet visuel.

DimpP [Dragicevic 2008] propose de manipuler directement et de façon continue le temps sur les vidéos en agissant de façon interactive et directement au sein des images sur les objets et trajectoires affichés (cf. Figure 137 au centre).

Glimpse [Dragicevic UIST'11] et *Animated Text Transitions* [Chevalier 2010] proposent d'utiliser l'animation pour naviguer visuellement entre deux représentations graphiques. *Glimpse* permet aux utilisateurs de basculer rapidement entre deux représentations : leur vue textuelle du code HTML et le rendu graphique de ce code dans une représentation de type browser Web. *Animated Text Transitions* offre une transition animée entre des révisions d'un texte afin de faciliter la compréhension des changements.

4.2.1.3.3. Continuité visuelle et lecture des informations

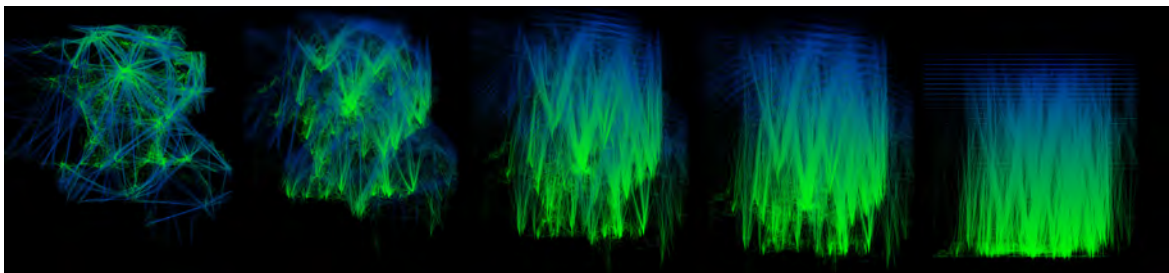


Figure 138 : *FromDady*, transition visuelle contrôlée par l'utilisateur d'une visualisation de données de trafic sur la France, entre une vue Latitude Longitude (à gauche) et une vue Altitude Longitude (à droite).

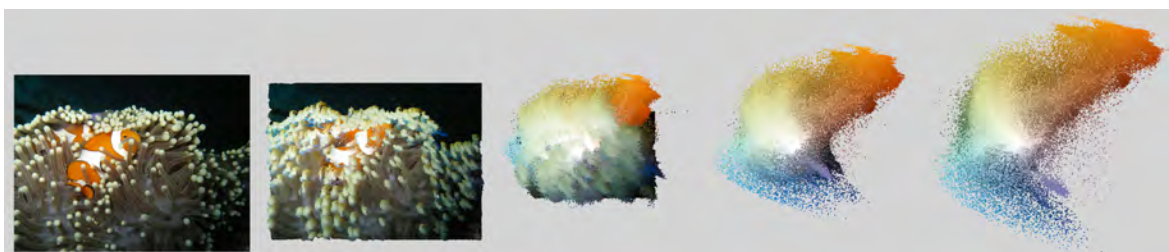


Figure 139 : *Color Tunneling*, transition contrôlée entre une vue image et une vue de l'espace chromatique

Dans le domaine de l'infovis, de nombreuses techniques graphiques ont pensé et instrumenté cette continuité visuelle et de la lecture des données, notam-

ment en permettant à l'utilisateur de concevoir, d'explorer et de contrôler de façon dynamique ses propres représentations.

FromDady [Hurter 2009] est un outil d'exploration de larges espaces de données, mettant en œuvre un ensemble de techniques de visualisation continue. Par exemple la possibilité pour l'utilisateur de mieux visualiser les transitions entre représentations multi-dimensions des données en contrôlant librement la transition. La Figure 138 montre une transition entre dimensions de données, ici un basculement contrôlé entre latitude et altitude des vols. Hurter a proposé plusieurs techniques graphiques de visualisation continue pour l'exploration et la fouille de données comme le *Bundling* [Hurter 2012] ou la *MoleView* [Hurter 2011]. *Color Tunneling* [Hurter 2014] présente une technique de type *Focus+Context* pour l'exploration visuelle de données. L'un des points forts de ces travaux réside dans la performance d'affichage qui rend possible l'interaction.

D'autres travaux, comme *ScanVis* [Conversy 2011], se sont attachés à la compréhension et la modélisation du processus continue de la lecture. *ScanVis* propose une méthode d'analyse et de description du parcours visuel dans la lecture des représentations d'informations. Ce travail vise à rendre explicite ce parcours visuel par une formalisation des séquences de tâches visuelles, afin d'aider les concepteurs à éliciter leurs choix de design.

4.2.1.3.4. Continuité d'accès visuel aux contenus et continuité de représentation des informations temporelles

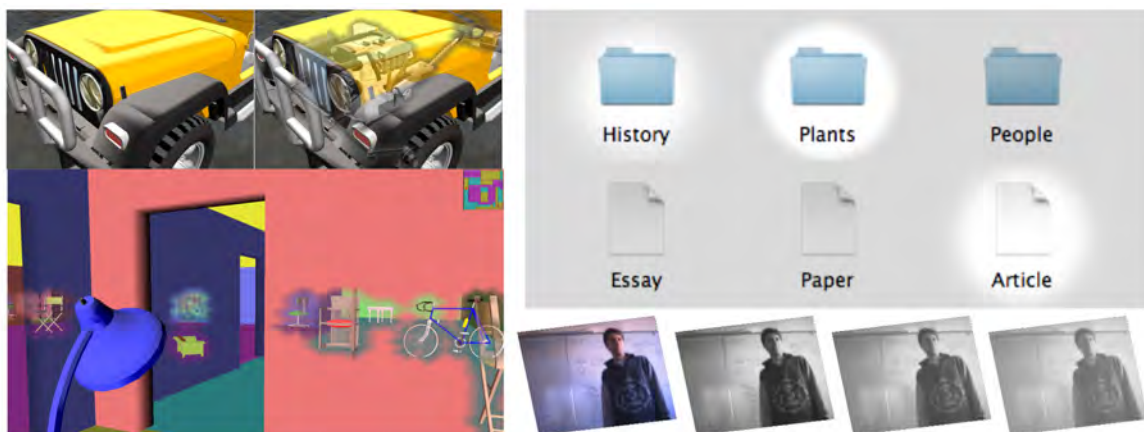


Figure 140 : Accès par transparence aux contenus [Elmqvist 2007] (à gauche), historique d'usage des fichiers [Fitchett 2013] (à droite en haut), codage de datation temporelle des images [Conversy 2003] (à droite en bas).

Permettre un accès visuel continu aux contenus et aux propriétés de l'objet ou de son usage est un challenge important pour les structures graphiques du GUI, notamment concernant l'accès aux contenus des structures hiérarchiques, mais aussi à l'historique d'usage par l'utilisateur.

Le concept de transparence dynamique présenté par Elmqvist et al. [Elmqvist 2007] adresse une gestion de l'occultation dans les environnements 3D. la Figure 140 à gauche présente deux exemples d'accès à des contenus par une transparence localisée des parties occultantes formées par la structure supérieure du capot ou par l'obstacle visuel des murs. Ce concept très intéressant est aisément transposable aux structures graphiques des espaces 2D du GUI.

Content-Aware Free-Space Transparency [Ishak 2004], propose de répondre au problème de l'accès visuel et interactif aux fenêtres superposées en ren-

dant dynamiquement transparentes les zones vides des fenêtres (Figure 141 à gauche). Cette technique préserve mieux la lisibilité des informations que la simple possibilité de rendre transparent l'ensemble du fond de la fenêtre.



Figure 141 : Accès au contenu caché *Interacting with Hidden Content* [Ishak 2004] (à gauche), *Visualizing Hidden Content* [Geymayer 2014] (à droite)

Geymayer et al. [Geymayer 2014] introduisent une technique qui permet de visualiser les contenus cachés d'une recherche. Ils proposent ainsi de rendre accessible l'ensemble des informations occultées : masquées par une autre fenêtre, affichées en dehors du viewport local, ou même situées en dehors des limites d'affichage de l'écran. Pour cela, ils mettent en oeuvre des liens semi-transparents ou sur les icônes applicatifs pour des documents non-ouverts, ou des vues recomposées agrégeant des zones d'intérêts clippées (Figure 141 à droite).

Fitchett et al. [Fitchett 2013] proposent de faciliter la navigation dans les hiérarchies de fichiers par des mécanismes dédiés permettant de réduire le nombre de niveaux à traverser, ou de mettre en évidence les fichiers selon une probabilité de pertinence par exemple selon la fréquence d'usage (cf. Figure 140 à droite en haut). Ce dernier point permet, tout spécialement, d'interroger le codage implicite de l'activité, du parcours et de l'usage des objets graphiques de l'interface.

L'une des idées de design de VideoProbe [Conversy 2003] est de coder visuellement une propriété temporelle de datation, ou plutôt d'ancienneté, des photographies prises par les utilisateurs. Un mécanisme visuel de *Picture Aging* modifie la représentation des photographies par une désaturation et une augmentation de la luminosité des images relatives à leur ancienneté (cf. Figure 140 à droite en bas), à l'exemple du vieillissement des photographies argentiques.

[Hurter 2009] caractérise un ensemble de représentations écologiques de données temporelles comme l'exemple de la comète radar utilisée par les contrôleurs aériens pour visualiser les positions passées de l'avion sur une image statique. L'intérêt de ce type de représentation visuelle des informations temporelles est qu'elle est accessible à la fois de façon statique et dynamique. L'utilisateur peut en effet lire l'information temporelle à chaque consultation, mais aussi percevoir l'évolution progressive de la représentation. *MAMMI* [Conversy 2011] présente plusieurs formes de représentation graphique continue du temps : timeline de planification des actions ; interaction d'extrapolation des vols sur l'image radar ; feedback graphique des gestes effectués par les contrôleurs sur la table, formant une rémanence visuelle du tracé qui disparaît progressivement et permet une meilleure conscience mu-

tuelle. Mnemonic Rendering [Bezerianos 2006] enregistre les modifications graphiques d'objets masqués à l'utilisateur (non visibles sur l'écran), pour restituer visuellement et de façon continue ces changements par l'utilisation d'animations ou de rémanences, lorsque l'action sur l'interface rendra à nouveau visibles ces objets.

4.2.1.3.5. Abstraction, adaptation, variations visuelles

La possibilité pour l'utilisateur de contrôler le niveau de détail de ses représentations ou pour le système d'adapter ce niveau de détail à l'espace d'affichage ou dynamiquement à l'interaction, mais aussi de présenter les variations visuelles possibles résultantes d'une action, est cruciale pour la problématique de continuité visuelle des représentations.

La Figure 142 à gauche en haut présente la notion d'abstraction visuelle par une réduction progressive du niveau de détail de l'image concrète (photoréalisme) à la représentation abstraite (schéma du haut tiré de Scott McCloud 1993). Avec XDoG, Winnemoller et al. [Winnemoller 2012], proposent des techniques graphiques avancées pour la stylisation des images par une réduction successive contrôlée du niveau de détail (cf. Figure 142 au centre).

Terry et al. [Terry 2004] fournissent un modèle d'interaction *Parallel Path* et une interface *Parallel Pies* basés sur le concept de variations, visant à permettre aux designers de générer, manipuler et comparer des variations de solution graphiques dans la transformation d'une image (cf. Figure 142 à droite). Ces variations peuvent être explorées, développées ou combinées, à l'exemple des roughs graphiques par un mécanisme de commandes.

Flipper [Sun 2005] est une technique de navigation dans les documents, inspirée du feuilletage des pages papier. L'aspect intéressant qui adresse la continuité visuelle est que l'interaction de navigation est *zoomable* avec un mécanisme d'accélération permettant de passer d'un mode scrolling normal à un mode flipping de feuilletage, ces deux modes s'accompagnant d'une modification du niveau de zoom de la représentation.

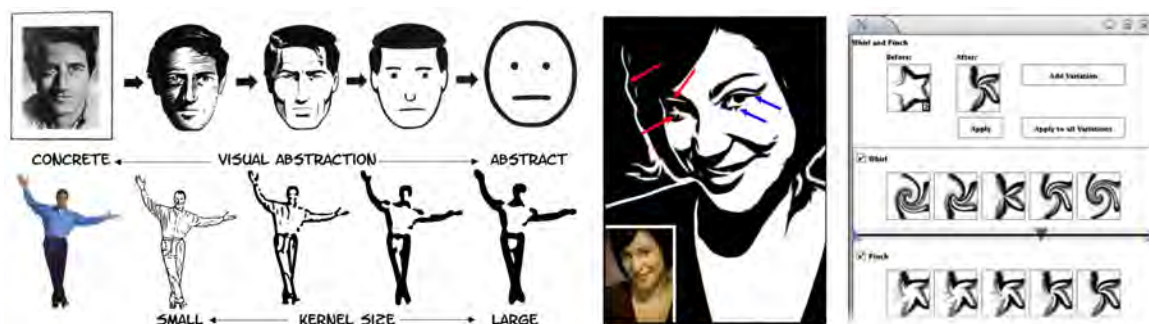


Figure 142 : Abstraction visuelle et simplification d'image [Winnemoller 2012] (à gauche et au centre), *Parallel Pies* [Terry 2004] (à droite).

4.2.2. Apports externes à l'IHM : interroger la continuité perceptuelle et structurelle des formes et des espaces

À ces nombreux travaux de recherche, internes à la communauté de l'interaction homme-machine, nous avons voulu plus largement interroger la notion

de continuité des espaces et des formes du monde physique dans les domaines de l'espace physique et de l'architecture.

4.2.2.1. *Espace et formes, heurts et obstacles*

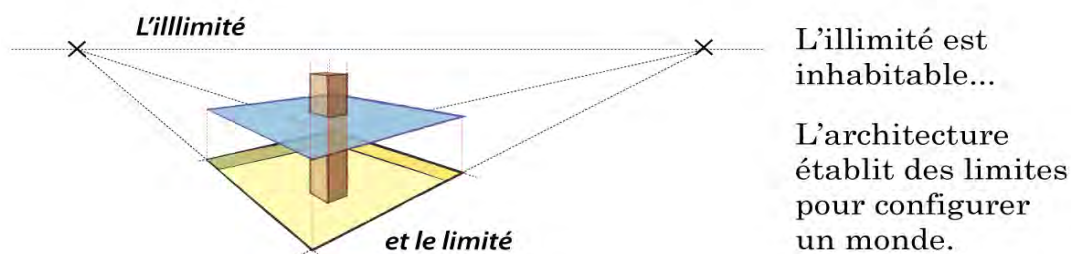
Dans la première partie de sa thèse « *Penser l'espace et les formes* », M.P. Corcuff s'attache à redéfinir les notions d'espace et de formes [Corcuff 2007]. Partant de l'expérience directe perceptuelle que nous avons du monde (la conscience du monde), elle définit l'espace comme un « *continu empirique* » en relation avec nous-même : un *espace vécu* qui est la confrontation de l'Homme, au travers de son système perceptif, avec les conditions matérielles de son existence. Plus précisément, elle énonce comme postulat que nous ne percevons l'espace que par les formes qui y établissent des coupures ou obstacles que nous heurtons perceptivement. « *Le parcours dans cet espace, c'est le déplacement, et ce qui empêche le parcours, ce qui entrave notre déplacement, ce sont les formes qui parsèment cet espace et à l'intérieur desquelles nous ne pouvons pas pénétrer* ».

Ce qui est ici important pour notre propos c'est que Corcuff rattache cette notion de déplacement à un aspect constitutif de *continuité* de l'espace, et que sa notion de *heur*t perceptif, issue de notre sens du toucher, peut être généralisée aux autres sens perceptuels, par exemple la vue. Ainsi la perception visuelle peut être considérée comme un *toucher à distance*, et les notions de transparence et d'opacité comme une variation du *degré d'obstacle formé par l'objet* à la perception. Nos perceptions de l'espace «vide», en *continuité*, qui permettent son parcours, seront «coupées» (empêchées) par des surfaces ou des formes infranchissables (opaques) ou *discontinuités*.

Ces notions de heurts et d'obstacles perceptifs, renvoient à l'approche écologique de la perception visuelle de James J. Gibson et notamment aux trois catégories de la matière : le medium, les substances et les surfaces [Gibson 1979]. Le medium correspond à l'espace continu permettant le déplacement, les substances correspondent aux objets, et les surfaces aux frontières entre substances et medium. Ces notions de limites de contact, ou de surfaces, ne doivent pas être envisagées comme des frontières étanches, des empêchements absolus à la préhension de l'espace au-delà, mais comme des repères nécessaires à notre propre situation, plus ou moins franchissables, c'est-à-dire filtrant la portion d'espace — et donc son contenu — située derrière l'obstacle. Nos déplacements dans cet espace en continuité, modifient la position relative des obstacles et notre « enveloppe » de perception et participent de la reconstruction et de la compréhension de parties d'espace contiguës accessibles et à la création de l'image mentale plus globale, en continuité, de l'espace. Par exemple pour la perception visuelle, les formes, arêtes, tracés, lumières ou textures, « habitant » l'espace visible en formant autant de discontinuités perceptives, sont autant d'indices organisés permettant de reconstituer les propriétés, régularités et relations des objets et des structures graphiques et la continuité [de parcours] de l'espace. De plus, les propriétés globales de la scène perçue, comme les transformations associées à notre vision perspective égocentrée (contexte lumineux, couleurs, nettetés, transparences, textures, matériaux), permettent de construire et de maintenir une représentation mentale complexe située, articulant discontinuités (formes) et continuité (espaces ordres et circulations), pour guider nos usages possibles du monde.

Cette relation perceptuelle espace-formes avec le monde matériel est explicitement mise en œuvre par l'architecture.

4.2.2.2. Limites et passages dans les espaces architecturaux



« La manière de tracer des limites et d'opérer des passages par transferts, incursions, interférences notamment, rend compte du mode d'expression propre à l'architecture et de sa façon d'agencer le stable et l'instable, le délimité et l'illimité, la mesure et l'incommensurable, la continuité et la discontinuité » [Younes 2008].

L'architecte érige des formes pour organiser l'espace et les usages. Depuis des millénaires, l'homme a appris à aménager des abris « naturels », puis à construire des bâtiments pour délimiter le monde à son échelle : se protéger de l'environnement et du climat, se regrouper et s'isoler, stocker des ressources et organiser la résidence et les activités, constituer un habitat. En architecture, les limites des édifices et des espaces fonctionnels sont matérialisées par des discontinuités physiques et perceptuelles, formées par des points, des lignes, des surfaces, des plans ou des volumes. Elles peuvent être de simples tracés, surfaces ou ouvertures créant des « délimitations » *matérialisées* par des ruptures principalement visuelles. Elles sont surtout réalisées par des discontinuités matérielles (solides) : dépressions ou élévations (marche, niveau) d'un plan horizontal, dressements verticaux (piliers, colonnes) souvent groupés en alignements, élévations et murs (haut ou bas, pleins ou ajourés), adossements, angles ou englobements, recouvrements ou surplombs, voûtes ou toits, circulations horizontales (couloirs, galeries) et verticales (escaliers, rampes)... [Ching 2007]. Ces formes architecturales (ou *pleins*) supportent, délimitent et distribuent les espaces (ou *vides*). Ils « forment » les espaces internes et permettent la connexion aux espaces d'environnement. Formes et espaces constituent la structure spatiale ou *dispositif* qui organise l'habitat.

Deux visions de l'architecture se sont historiquement affrontées sur la place respective et les relations entre formes et espace. Une vision plus classique, orientée forme, postule la forme comme objet et l'objet comme sculpture. La forme architecturale qui « donne corps » à la matière et à l'édifice est alors l'objet premier d'attention, avec un but essentiellement esthétique. Une vision plus contemporaine, aujourd'hui très largement dominante, définit comme priorité l'espace et se centre sur l'usage. Pour cette approche, la forme est utilisée comme un matériau d'édification et de structuration de l'espace architectural. Elle s'attache à la conception du *dispositif spatial* d'habitat [Borie 2006]. La Figure 143 est un rendu architectural présentant le hall du nouveau centre de congrès de Nancy, réalisé par l'architecte M. Barani. Le projet illustre bien cette vision contemporaine de l'architecture : création de larges espaces fonctionnels réalisés avec une grande économie de forme et de matière ; limites très ouvertes (surplomb d'un seul tenant de la dalle suspendue, niveaux ouverts en balcons, galeries latérales ouvertes, passages en plans inclinés...) ; espace fortement connecté aux espaces adjacents par des circulations fluides, visuelles et physiques (vitrages continus, rampes, croisements des passages, continuité de l'espace entre intérieur et extérieur...).



Figure 143 : Conception du nouveau centre de congrès de Nancy,
Marc Barani architecte

Issu du latin *limes* qui désigne le chemin bordant un domaine ou le sentier entre deux champs, la notion de *limite* se situe à la transition de deux espaces, déterminant à la fois l'un en le distinguant et en l'articulant à l'autre qui lui est adjacent. Le *passage*, dérivé du latin tardif *passare*, « passer » « traverser » traduit à la fois l'ouverture vers, la relation à, et la transition entre [Younes 2006]. Les ouvertures et passages, internes et vers l'extérieur, qu'ils résultent de l'agencement ou de la géométrie des formes, ou qu'ils soient ouverts-percées au sein de ces formes, permettent d'accéder visuellement à distance ou physiquement, et de se déplacer de façon progressive et continue dans le dispositif spatial.

Ces deux termes de *limite* et de *passage*, étymologiquement proches, recouvrent un même concept de matérialisation d'un espace en soi de la transition. La limite n'est pas une frontière absolue, un contour terminal sans épaisseur, mais une zone «vivante», de dimensions non-nulles (temporelle ou spatiale), où l'on peut stationner, que l'on peut parcourir, et d'où il est possible d'appréhender « *d'un seul tenant* » les deux espaces adjacents, pour échanger et faire communiquer.



Figure 144 : Rampe continue d'exposition du musée Guggenheim
de New-York, architecte Franck Lloyd Wright

Ainsi, l'architecture en spirale du musée Guggenheim de New-York conçu par F. L. Wright s'inspire de la forme continue des structures organiques en évoquant une coquille de nautilus. L'espace muséal est organisé sous la forme d'une très longue rampe circulaire, en spirale, permettant l'affichage et le parcours continu, en *pente douce* des œuvres (cf. Figure 145). La zone de passage se confond ici avec l'espace tout entier créant une évidence de continuité d'accès et d'usage.

4.2.2.3. *Forme et déformation des objets architecturaux*

Dans leur ouvrage «*Forme et déformation des objets architecturaux et urbains*», Borie, Micheloni et Pinon [Borie 2006] abordent le domaine de la morphologie en analysant un corpus de formes architecturales et urbaines sous l'angle de la *déformation*. Cette étude est fondée sur deux systèmes d'analyse. Un premier système, d'analyse structurelle, décompose les formes en éléments constitutifs et permet de qualifier les éléments formels, la nature de leurs rapports de liaison (positionnement, obéissance, intégration) et la modalité de ces rapports (intégrité, déformation, articulation). Un deuxième système, d'analyse architecturale, décompose les formes architecturales et urbaines en *niveaux constitutifs* matériel (structuration de la matière) et spatial (structuration de l'espace). La réflexion s'ancre dans le rapport forme/architecture de C. Alexander, sur l'adaptation réciproque ou *adéquation* de deux entités : la forme considérée et son contexte [Alexander 1971]. Les auteurs développent la notion de déformation comme celle d'une contradiction : « *la déformation apparaît alors comme le phénomène par lequel une forme contrariée se modifie* ». Les principaux termes de la contradiction peuvent relever : du programme, du contexte physique, ou du modèle formel. Les situations de contradiction peuvent apparaître dès la phase de conception, par exemple entre données du programme (plan d'architecture) générant des incompatibilités entre usages, ou entre programme et contexte comme l'inadaptation d'une forme architecturale à la topologie du lieu, ou entre programme et modèle formel (ex. modèle formel contraignant l'usage), etc. [Borie 2006]. Les contradictions résolues se traduiront par une adaptation réciproque [Alexander 1971].

Dans la Figure 145 à gauche, le projet de plan pour la ville de Saint-Petersbourg est pensé en adéquation entre la topologie du lieu (terrain et cours d'eau) et la conception abstraite de la cité. Le projet articule : le rôle défensif de l'ouvrage avec sa structure externe étoilée de l'enceinte des murailles ; l'implantation urbaine interne, qui organise le système de circulation des réseaux de voies à partir des éléments nodaux des places et des bâtiments principaux ; la forme organique centrale du fleuve, qui régit les axes de construction de la cité et la connexion au monde. Les contradictions non résolues initialement entraîneront des déformations : par ajustement de la construction (exemple des raccords ou de rattrapages du bâti) ; par retouches ultérieures de l'ouvrage pour adapter l'usage ; par déformation dans le temps avec le vieillissement des matériaux, l'action du contexte géographique (mouvement du sol) ou climatique (vent, pluie) ; par adaptation à l'occupation humaine (ouverture de nouveaux passages, agrandissements) et à l'usure de l'habitat des lieux. Le plan du Palais Massimi à Rome (Figure 145 à droite) montre un exemple de déformations constituées par la juxtaposition et superpositions successives de formes architecturales implantées sur d'anciennes parcelles formées pour d'autres usages et souvent mal adaptées au nouveau projet.

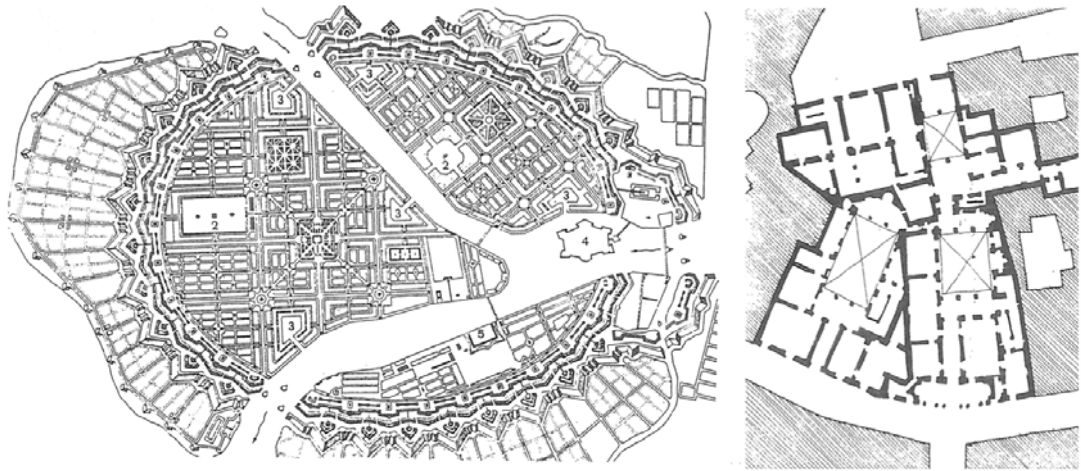


Figure 145 : Formes et déformation urbaines et architecturales, projet pour Saint-Petersbourg, J.B. A. Leblond, 1717 (à gauche), Palais Massini à Rome, XVI^e siècle (à droite).

La notion de déformation liée au contexte est ici principale. Elle rejoint la notion de formes et d'architectures *organiques*, caractérisées par une organisation implicite et très progressive du bâti et par une adaptation continuelle des formes à leur contexte et aux usages. Un exemple simple est celui des chemins de traverse dont la création, mais aussi le tracé, la forme et l'importance changeantes résultent de la topologie du terrain et des passages répétés. Le développement récent de l'architecture adaptative veut intégrer cette nécessité de déformation à la conception architecturale en développant des techniques d'adaptation automatique et continuelle des structures et des bâtiments à l'usage et au contexte, par exemple à l'ensoleillement, à l'adaptation de la taille d'une pièce au nombre de personnes qui l'occupent, ou à la température extérieure (cf. Figure 146).

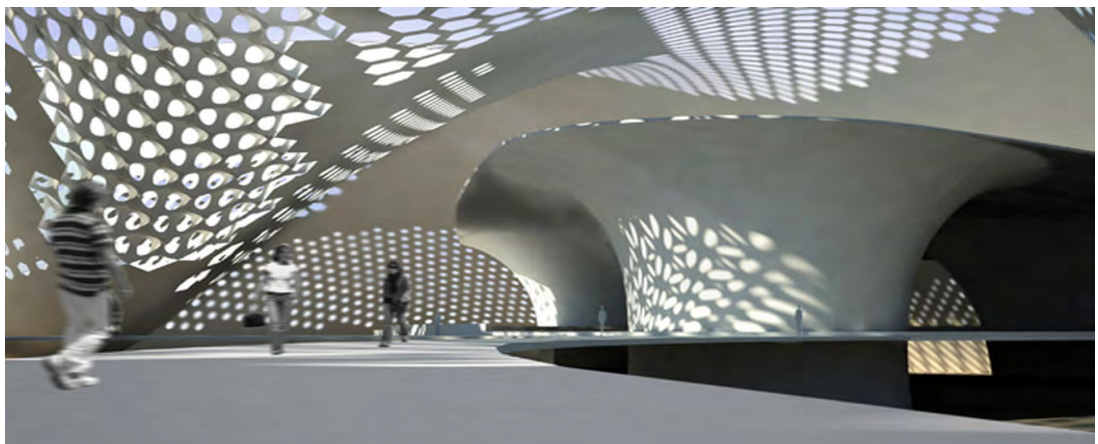


Figure 146 : Un concept de matériau intelligent, ici une fibre composite permet l'adaptation de la forme architecturale à l'environnement.
Design M. Mingallon, S. Ramaswamy, K. Karatzas.

Ces notions de relations entre formes, de contradiction formelle à résoudre, de déformation et d'adaptation au contexte, sont transposables au contexte d'espace numérique et notamment aux interfaces graphiques. Le principe de déformation liée au contexte d'usage semble un outil intéressant pour penser l'adaptation des formes graphiques de l'interface dans le cadre d'activités complexes. Un tel mécanisme pourrait y être intégré comme une propriété programmée des objets de l'interface graphique, participant du concept de continuité des espaces et des usages.

4.3. Continuous GUI: définition d'une problématique

L'analyse initiale, réalisée sur la base de documents, a permis de confronter le concept de continuité aux interfaces graphiques actuelles. Nous avons identifié un ensemble de problèmes potentiels d'utilisabilité qui relèvent notamment d'une certaine rigidité de l'architecture graphique et d'une segmentation des composants sur l'interface. Nous avons parallèlement rassemblé sous la forme d'un état de l'art, les nombreux travaux de recherche de l'interaction homme machine adressant ces besoins et que nous associons au concept de continuité. Nous avons complété cette revue par la convocation d'apports externes au domaine concernant plus spécifiquement la continuité des structures spatiales.

À partir de ces premiers apports nous pouvons poursuivre plus avant notre analyse des besoins graphiques de l'interface des systèmes interactifs, en ciblant les systèmes et usages complexes, pour définir une problématique de la continuité dans les GUI.

4.3.1. Expression de besoins pour la continuité

Nous avons articulé cette expression de besoin pour la continuité en observant deux contextes de complexité des interfaces graphiques : le contexte des interfaces du cockpit des avions commerciaux et celui de l'interface utilisateur des ordinateurs personnels dans un cadre d'usage simultané de ressources et d'applications logicielles multiples.

4.3.1.1. *Systèmes interactifs critiques et interfaces complexes du cockpit*

4.3.1.1.1. Évolution des interfaces du cockpit

■ Glass cockpit

Depuis 1984 et le lancement du programme Airbus A320, premier avion civil à commandes de vol entièrement informatisées, l'évolution technique des postes de pilotage a été constante. Le concept de « Glass Cockpit » avait alors transformé radicalement les interfaces du cockpit des appareils commerciaux en remplaçant les très nombreux instruments mécaniques (cadrons, jauges, horizon artificiel) par un affichage sur écran des données des différents systèmes avions. Ces données ont été regroupées par ensembles fonctionnels et affichées sur différents écrans, spécifiquement dédiés à chacune des activités principales des pilotes : pilotage, navigation, supervision avion, communication, information... (voir la section 2.2.1.1 Analyse de l'activité et des besoins qui présente ces activités).

■ Interactive Cockpit

En 2001, la complexité toujours croissante des systèmes avions conduisait à une approche plus intégrative du cockpit avec une agrégation des différents systèmes CDS (Cockpit Display System), une intégration des systèmes OIS (Onboard Information System) et OMS (Onboard Maintenance System), et à la conception d'une nouvelle interface utilisateur, affichée sur plusieurs écrans et pilotée de façon continue avec un pointeur unique (un curseur par pilote). La première version du standard ARINC 661 [Barboni 2006], intro-

duite par le programme Airbus A380, normalisait la définition du système d'affichage de cockpit (CDS), et la communication entre le CDS et les User Applications (UA) qui gèrent les fonctions de l'avionique. Ce nouveau concept nommé *Interactive Cockpit* présentait une interface proche du paradigme WIMP (cf. Figure 147), mais plus statique, avec des widgets classiques de l'informatique personnelle (containers, menus, boutons, onglets et pages, labels et champs...). La Figure 147 (à droite), présente un exemple de ces widgets définis par la norme ARINC 661, composés pour des pages de l'écran MFD (Multi Functional Display).



Figure 147 : Interfaces graphiques multi-écrans pour l'aéronautique, cockpit de l'A350 (à gauche), détail de deux pages MFD (Multi Functionnal Display) affichant un ensemble de widgets (à droite).

■ Synthetic Vision System

Ces évolutions des interfaces cockpit de l'aviation commerciale restent basées sur une présentation séparée des données entre les différents systèmes, avec des écrans et panels spécialisés pour chacune des activités des pilotes, une permutation des affichages entre écrans étant néanmoins possible. Dans l'aviation militaire, d'affaire, ou pour les cockpits d'hélicoptères, d'autres concepts d'interface plus innovants fusionnent l'affichage des données issues de différents systèmes. Le concept SVS (Synthetic Vision System), conçu par la NASA, superpose à une vue 3D du contexte avion, une vue géographique du terrain survolé, les données avion, de navigation et de situation, par exemple les informations de trafic et anti collision (TCAS), les obstacles (constructions)... Ce type de représentation favorise la conscience de la situation (Situational Awareness) par les pilotes. La Figure 148 présente deux interfaces cockpit, EasyII et Epic 2.0, développées par Honeywell pour des programmes d'aviation d'affaire (Falcon de Dassault ou Gulfstream de Gulfstream Aerospace), et basées sur l'utilisation de vues synthétiques 3D.



Figure 148 : Interfaces SVS pour le cockpit : vue synthétique 3D du système SVS du Falcon 900 (à gauche), système SVS *Primus Epic 2.0* d'Honeywell pour le cockpit des programmes Gulfstream et Falcon (à droite).

4.3.1.1.2. Nouveaux concepts IHM, nouveaux besoins graphiques

■ Nouveaux concepts



Figure 149 : Nouveaux concepts de cockpit étudiés par Thales, démonstrateur ODICIS de surface continue (à gauche), Cockpit avionics 2020 (à droite)

La Figure 149 présente deux concepts exploratoires de Thales pour les cockpits des futurs programmes avions et hélicoptères. À gauche, le démonstrateur ODICIS présente la particularité d'une surface d'affichage continue non plane (développable) permettant de composer librement les interfaces du cockpit. À droite, le concept Avionics 2020 propose un cockpit composé d'un ensemble d'écrans tactiles en « T » et des interactions directes. Selon ses concepteurs, un tel cockpit doit reposer sur les « principes d'une architecture ouverte, d'une interface homme-machine et de fonctionnalités personnalisables ». Ces concepts qui veulent repenser les dispositifs interactifs du cockpit, illustrent une tendance à la dématérialisation progressive des actuels panels du cockpit, encore largement basés sur des écrans dédiés et sur l'usage de contrôleurs physiques, boutons ou manettes.

Cette évolution présente des avantages importants pour les industriels en termes de flexibilité, de coûts, et de facilité d'évolution (upgrades, correctifs, personnalisations). Elle permet aussi le développement d'une ligne de produits génériques (product line) facilement adaptable à différents programmes avion et hélicoptères. Pour les concepteurs, elle ouvre une possibilité de décroiser les interfaces actuelles, spécialisées par systèmes et séparant affichages et contrôleurs, pour fournir aux pilotes plus de continuité et de plasticité des affichages et des interactions. Elle permettrait une adaptation des représentations et des contenus aux besoins et aux contextes, par exemple en fonction de la phase de vol, et une liberté de composition par les pilotes des éléments graphiques et des flots de données requis, leur permettant de répondre à des situations particulières, imprévues ou à des événements critiques.

■ Nouveaux besoins graphiques

Ces nouveaux concepts nécessitent une architecture graphique différente, ou du moins une évolution, des standards type ARINC 661, qui permettent de spécifier les interfaces actuelles des cockpits d'aviation commerciale. En effet, l'un des principes majeurs des modèles graphiques actuels est de définir de façon très « contractuelle » les objets graphiques du cockpit et leurs liaisons aux modèles de données, leur composition sur les différents écrans et les comportements interactifs. Ce principe qui permet de décrire, prédire et tester l'affichage et le comportement graphique, contraint aussi très largement le comportement graphique et interactif ou la composition souple par le pilote des composants. Il empêche par exemple le placement ou la transformation libre des vues.

Les nouveaux besoins concernent donc principalement les mécanismes et modèles, fournis aux utilisateurs/pilotes, mais aussi aux concepteurs des interfaces de composition et transformation des vues, d'exploration, de filtrage ou de liaison de données issues de multiples systèmes, d'adaptation automatique ou contrôlée de la représentation, du niveau de détail, du rendu graphique, ou de l'utilisation coopérative des informations et de la conscience mutuelle de la situation. Il s'agit surtout pour les concepteurs de mieux adapter une complexité toujours croissante des informations au contexte ou à la phase de vol, et de permettre aux pilotes de mettre en oeuvre, d'organiser ou de construire si besoin, des représentations interactives et mentales partagées des systèmes avion, du vol et de la mission pour mieux structurer et planifier leurs actions. Leur permettant ainsi de répondre à des situations imprévues ou critiques.

4.3.1.2. *Systèmes grand public : surface d'affichage restreinte et activités complexes*

Après cette analyse du contexte graphique des interfaces du cockpit des avions commerciaux, nous avons mené un recueil de besoin pour les interfaces des systèmes de type PC auprès d'utilisateurs experts et designers.

4.3.1.2.1. *Diversité des dispositifs, complexité graphique et limitations de l'affichage*

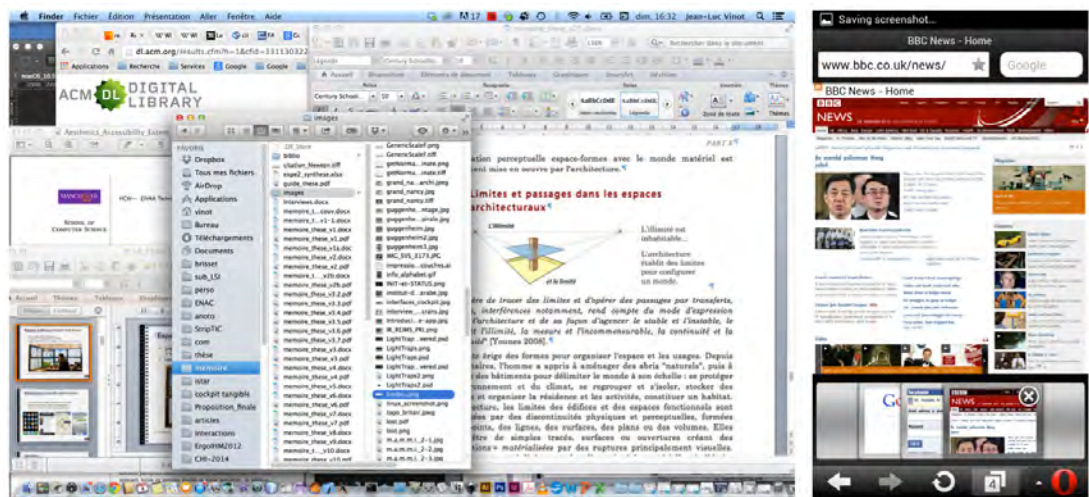


Figure 150 : Surface d'affichage versus densité d'information : composition d'applications multiples sur un écran 30» (à gauche), affichage graphique complexe d'une application browser sur smartphone (à droite).

Les dispositifs numériques personnellement régulièrement utilisés aujourd'hui dans les cadres professionnel et privatif sont divers : ordinateurs, tablettes smartphones, liseuses... Ils présentent notamment de grandes disparités physiques, par exemple de taille, poids ou d'encombrement, qui permettent d'adapter des usages numériques souvent assez semblables à des contextes d'usages variés, comme l'usage en mobilité. Ces particularités matérielles et des utilisations, entraînent des conséquences sur les choix de design des interfaces graphiques. Même si la résolution graphique ou la précision de l'interaction, ou encore les ressources et données manipulées, peuvent être assez comparables entre dispositifs, les disparités d'usage (fonctionnelles, ergonomiques) font encore coexister deux types d'interface utilisateur très

différenciés. Un premier usage, de type « position de travail bureautique », conserve une approche orientée fenêtres avec l'ouverture simultanée d'applications multiples. Le deuxième usage, de type « mobilité connectée », privilégie une approche orientée page et une permutation d'affichage entre des applications « plein écran ».

La Figure 150 présente des copies d'écran illustrant ces deux approches. A gauche, l'affichage rendu par OSX 10.9, un GUI de type bureau, sur un écran 30" de bonne résolution (2880 × 1800). A droite l'affichage rendu par un navigateur android (Opera Mini) sur l'écran d'un smartphone (540 × 960). Ces deux images illustrent la difficile équation entre taille d'affichage, nombre d'applications ouvertes et complexité graphique.

Malgré sa taille conséquente d'affichage, l'écran 30" ne permet pas forcément une composition idéale de multiples applications (cf. Figure 150 à gauche). Chacune des applications nécessite souvent une surface écran importante pour afficher la fenêtre elle-même, avec ses barres de titre, menus, et contrôles, voire de multiples sous fenêtres (palettes, contrôles), et surtout une partie suffisante du contenu lui-même. Cet exemple d'écran *bureautique* est graphiquement complexe : il affiche de façon simultanée et sur une même surface de rendu, plusieurs milliers d'objets visuels et interactifs. Six fenêtres sont visuellement accessibles sur une vingtaine de fenêtres ouvertes. L'écran du smartphone, présenté par la Figure 150 à droite, même avec une bonne résolution et une interface ad-hoc, affiche difficilement le contenu complexe d'une unique application. Néanmoins cet exemple nous montre également l'affichage, en dessous de la composition déjà complexe de la page web consultée, d'une deuxième vue correspondant à une galerie de snapshots. Ceci illustre une tendance possible (de nouveaux besoins ?) à la complexification graphique, c'est-à-dire afficher simultanément plus de contenus à l'écran, de l'interface des dispositifs mobiles.

4.3.1.2.2. Recueil de besoins : gestion de l'affichage en contexte multi-applications

Dans le but de mieux comprendre les problèmes d'affichage posés par l'utilisation successive ou simultanée d'applications multiples, nous avons mené un ensemble de recueils concernant l'activité de travail sur écran, en environnement informatique grand public de type PC. Deux ateliers ont été conduits avec des utilisateurs experts en informatique, sur le thème de l'habitat interactif : environnement informatique et structure applicative. Deux séances d'interviews ont ensuite été réalisées auprès d'une équipe de designers et avec une chercheuse en IHM, portant plus spécifiquement sur l'organisation personnelle de l'écran et sur l'utilisation conjointe de plusieurs fenêtres applicatives.

■ Ateliers habitats interactifs, phase 1

Ces ateliers ont regroupé une douzaine d'utilisateurs experts, ingénieurs de recherche et chercheurs en IHM. L'objectif de cette première phase était d'identifier les usages informatiques particuliers de participants experts. Dans un premier temps, il était demandé aux participants de présenter au groupe, sous la forme de « portrait-chinois », un schéma-poster commenté de leur environnement interactif personnel : équipements électroniques utilisés

quotidiennement dans le cadre professionnel et privé. La Figure 151 présente deux exemples des posters réalisés. Ces configurations qui présentent l'environnement d'utilisateurs experts, intègrent le plus souvent de nombreux matériels et équipements, très largement connectés entre eux et sans frontières « étanches » entre espace de travail et vie privée. Les caractéristiques matérielles et d'affichage sont variées (des smartphones aux écrans grand format) et les ressources et données (locales et virtuelles) sont accessibles et partagées au travers le réseau.

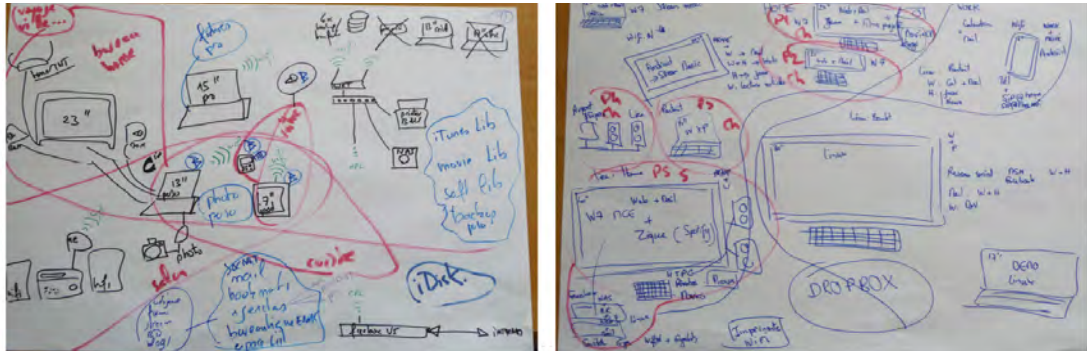


Figure 151 : Deux exemples d'environnement matériel / système présentés par deux participants de l'atelier pour décrire leur usage informatique personnel

Une deuxième période était consacrée à l'instrumentation logicielle de l'activité professionnelle (pouvant intégrer des besoins privés). Le but était de comprendre l'organisation de ces usages sur une surface d'affichage de type PC. Il était demandé aux participants tout d'abord d'identifier et de noter à l'aide de Post-It, les tâches principales de leur activité professionnelle réalisées à l'aide de l'outil informatique (cf. Figure 152), en les reliant aux différentes applications, outils ou ressources, couramment ouverts sur leurs écrans.

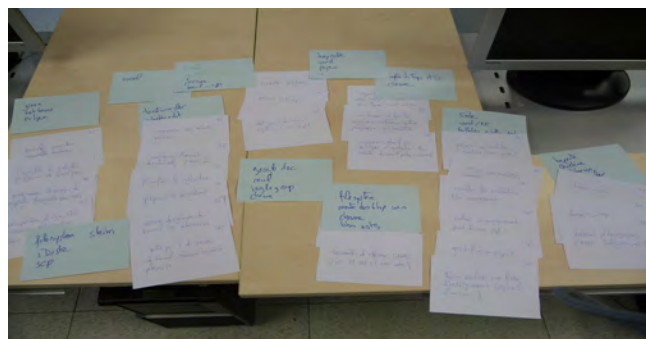


Figure 152 : Identification sur post-it par les participants, des tâches professionnelles habituelles réalisées à l'aide des outils informatiques

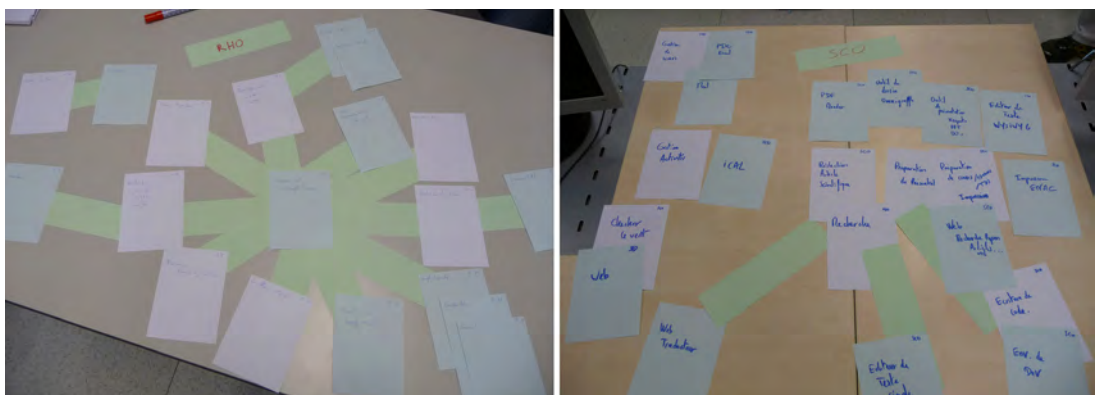


Figure 153 : Deux exemples présentant l'usage de différents logiciels et outils pour supporter les activités habituelles de deux participants.

Il leur était demandé ensuite d'organiser ces Post-it pour représenter de façon structurée leur usage des outils logiciels en fonction de leurs différentes activités et notamment les interactions entre outils concourant à la réalisation d'une activité unique, ou les basculements entre tâches concurrentes. La Figure 153 présente deux exemples de ces représentations orientées logiciels de l'activité numérique des participants. Ces différentes représentations montrent la diversité des ressources logicielles mises en œuvre pour mener ces activités et tâches.

4.3.1.2.3. Observations des utilisateurs

Des observations/interviews ont été réalisées, auprès de professionnels du design et de l'informatique, pour observer comment ces utilisateurs configuraient leurs écrans en fonction de leurs activités. Nous restituons ici deux exemples issus de ces interviews : les retours d'expérience d'un designer (design produit) sur son usage de l'interface graphique pour supporter ses activités professionnelles, et l'observation d'une chercheuse en IHM pendant une activité de transcription vidéo nécessitant l'emploi simultané de quatre applications.

■ Interview 1 : environnement numérique pour une activité de design

Y est designer, son poste de travail habituel est composé d'un portable MacBook pro avec un écran supplémentaire 22» HD. Il a configuré trois écrans (bureaux) virtuels et bascule entre eux par un drag sortant vers l'extérieur de l'écran qui lui permet d'afficher le bureau suivant/précédent.

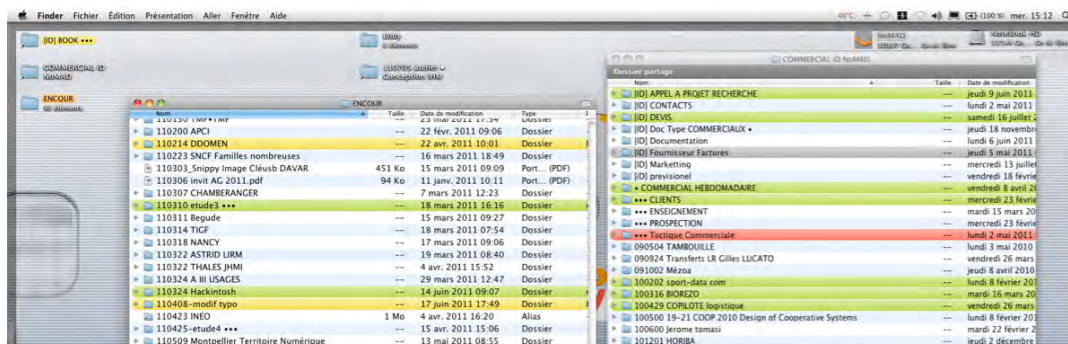


Figure 154 : Un usage du Finder pour structurer l'activité, avec un code couleur d'avancement et un nommage des fichiers orienté date projet.

De nombreuses applications sont ouvertes de façon quasi permanente, notamment graphiques (*Illustrator*, *PhotoShop*), de communication (mail, chat, *Skype*), de prise de notes et to-do list (*Notational Velocity*) plusieurs éditeurs Web (*Safari*, *Chrome*), *Ical*, mais aussi un terminal... avec une préférence pour l'usage plein écran (22» et 17») des applications. Il fait une utilisation centrale et particulière du Finder pour organiser le travail de l'entreprise en projets, en utilisant les marqueurs couleurs et un système de nommage basé sur la date des livrables et le nom des projets qui lui permet de hiérarchiser l'affichage et de favoriser sa navigation (cf. Figure 154). Il regrette à cet égard l'impossibilité pour lui de spécifier librement un champ date personnalisé (ex. dates projet) aux fichiers. Pour lui cette notion temporelle est essentielle : pouvoir « tagger le temps, ajouter des timelines au browser, modifier l'affichage des icônes selon l'évolution ou la mise à jour des fichiers... » ou « convoquer le collectif avec des calendriers partagés ». Il « rêve » aussi d'une vraie configura-

tion par client de son interface graphique (polices projet, profil colorimétrique, ...) et de pouvoir sauvegarder la composition précise de ses affichages (écrans, fenêtres et ressources) dans leur dernier état d'usage. Il considère insatisfaisantes ces possibilités d'affichage et de composition, ou les fonctionnalités d'organisation et de filtrage (ex. pour le tri de ses mails).

Étant graphiste, l'expression graphique de l'interface n'est pas anodine pour lui. Il l'aimerait « *sensible, modelable, plastique... un environnement riche pour cultiver l'originalité... explorer les possibles...* » il la trouve trop « *propre et rigide* » et préférerait « *des choses plus sales, plus libres... comme une table lumineuse, de montage... avec des placements aimantés* » Il aime la notion de « *création de pile d'objets* » comme dans Aperture qui lui permet de gérer des milliers de photos.

■ Interview 2 : configuration interactive d'une activité complexe

C est chercheuse en IHM, elle mène des interviews ou des ateliers avec les utilisateurs pour recueillir les besoins ou faire des séances de conception participative. Pour analyser ultérieurement ces séances, elle utilise un stylo Anoto pour prendre des notes numériques (écrites et sonores) et une mini-caméra pour filmer les discussions ou réaliser des vidéos de prototypage. Elle nous a expliqué le processus de retranscription de ces données sur son portable Mac, en faisant appel à quatre applications différentes ouvertes simultanément sur l'écran de faible résolution (1440 × 900 px) du portable. La Figure 155 présente la composition d'affichage des quatre applications utilisées : iMovie pour la vidéo, LiveScribe Desktop pour le parcours des annotations Anoto (écrites et sonores), TextEdit pour l'édition du document de retranscription, ainsi que le Finder pour gérer les ressources (images).

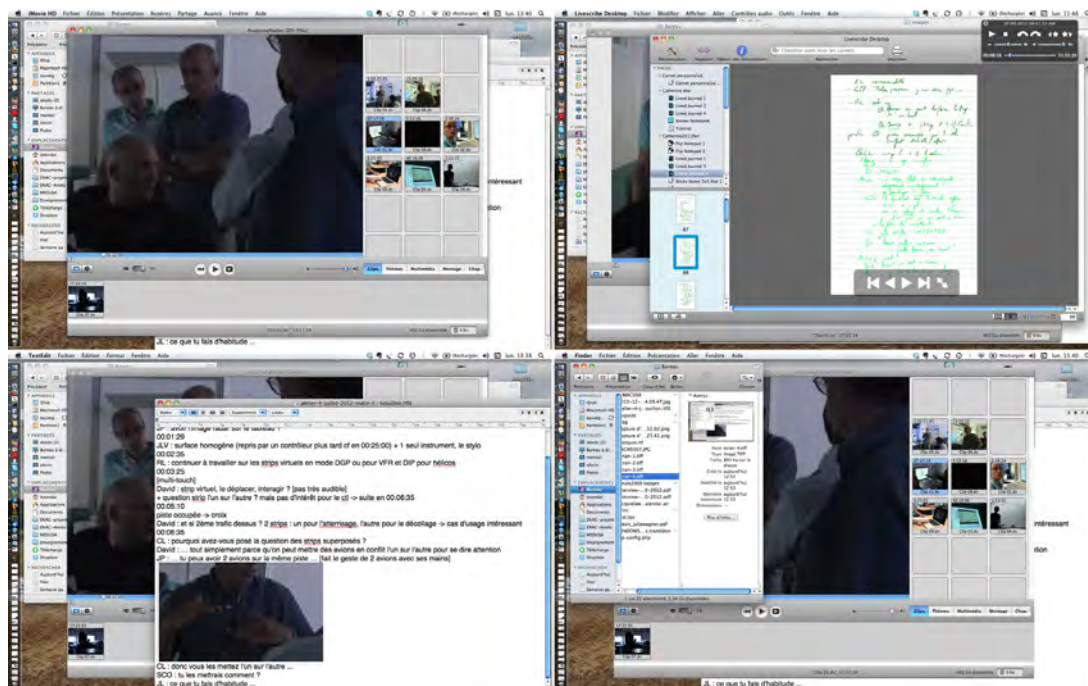


Figure 155 : Composition écran et basculement de focus entre les quatre applications logicielles « empilées », pour réaliser un travail de retranscription

La composition des applications sur l'écran est très « précise » : les fenêtres sont largement dimensionnées, couvrant près des deux tiers de la surface de l'écran, et donc largement superposées. Leur positionnement, avec un *décalage* optimum en x et en y, permet de les sélectionner facilement à l'arrière-plan

pour changer le focus applicatif, tout en laissant visible des parties intéressantes de chacune des trois applications principales : les 2 sources *iMovie* et *LiveScribe*, et l'éditeur *TextEdit*. Toutefois, les contrôleurs vidéo et LiveScribe sont inaccessibles, et même souvent non affichés, hors focus de l'application. De plus, l'affichage des vues est souvent contraint par la place excessive prise par les éléments de taille fixe de l'application, comme le header de LiveScribe, et défavorisé par la faible résolution écran. La réification des objets images permet néanmoins leur copie par Drag&Drop entre applications. Ce travail de transcription est très long : visualisation d'une séquence courte vidéo, corrélation avec les notes, retranscription du texte avec inclusion régulière d'image extraite de la vidéo. Il nécessite d'incessantes interactions réalisées avec de grands déplacements du curseur, et de continuelles permutations entre les applications qui engendrent de forts basculements visuels.

4.3.1.3. Configuration graphique des interfaces par les utilisateurs

Ces analyses de l'existant des interfaces graphiques ont montré que les capacités réelles de configuration de l'affichage par les utilisateurs finaux sont limitées. Plus exactement, la possibilité pour ceux-ci de contrôler précisément ces affichages, formes, composition, et même contenus, est globalement faible. La possibilité d'enregistrer des états graphiques ou de sauvegarder des configurations d'affichage est encore plus réduite. Nous présentons ici les possibilités offertes aux utilisateurs, mais aussi aux concepteurs pour contrôler leurs affichages, dans le contexte du cockpit puis dans celui des interfaces graphiques des ordinateurs personnels.

4.3.1.3.1. Interfaces du cockpit : un système d'affichage verrouillé

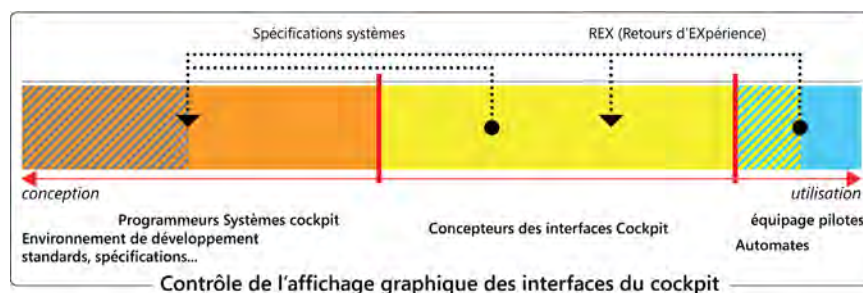


Figure 156 : Schéma de principe des parties prenantes dans le contrôle de l'affichage final des interfaces du cockpit

Dans l'analyse des interfaces du cockpit, nous avons constaté que l'action potentielle des pilotes sur les affichages était très fortement contrainte et limitée. Le schéma de principe de la Figure 156 illustre la répartition de la responsabilité entre les différents acteurs de l'affichage final des interfaces du cockpit. Les programmeurs des systèmes participent à la définition et utilisent les standards de spécification et de programmation graphique comme le standard ARINC 661 [Barboni 2006], choisissent les environnements de programmation, langages, bibliothèques, IDE, et développent les interfaces elles-mêmes. Les concepteurs des interfaces du cockpit, experts FH, ingénieurs et experts pilotes, définissent les besoins et les procédures et spécifient les interfaces graphiques du cockpit, les objets graphiques et leurs comportements, le lien aux données, les modèles de fonctionnement des automates systèmes comme le Pilote automatique (PA) et leur action sur les affichages. Les utilisateurs finaux, les pilotes, ne peuvent modifier que de façon très contrainte

et très partielle ces affichages : par exemple sélectionner la page affichée sur l'ECAM pour visualiser des informations complémentaires, sélectionner un mode de visualisation (ex. représentation de la navigation), utiliser un widget, ou encore permuter l'affichage de certains écrans. Ils ne peuvent en aucun cas modifier la composition ou le niveau de contenu des informations ou ajouter des informations par exemple pour externaliser des représentations cognitives.

Ces rôles sont très étanches et ne permettent pas à l'utilisateur final d'adapter son interface à la particularisation visuelle des informations ou à la programmation de planifications, ni à l'exploration interactive de situations nouvelles.

4.3.1.3.2. Interfaces grands-publics : une personnalisation limitée

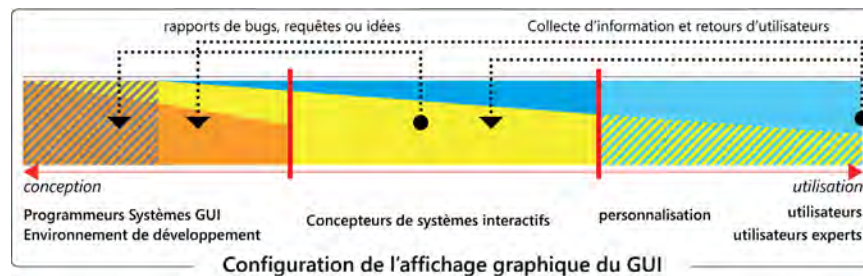


Figure 157 : Schéma de principe des parties prenantes dans le contrôle de l'affichage final des interfaces graphiques utilisateur

Concernant les interfaces graphiques utilisateur, la répartition du contrôle de l'affichage est plus équilibrée entre les différents intervenants. Le schéma de principe présenté par la Figure 157 illustre cette répartition des rôles. Dans cet environnement moins contraint que celui du cockpit, le dogme de la sécurisation des processus existe pour l'architecture système et affecte fortement les choix des programmeurs des systèmes d'exploitation, mais les utilisateurs programmeurs et surtout les concepteurs et développeurs d'applications peuvent s'affranchir de certaines contraintes en utilisant ou en remplaçant les bibliothèques systèmes ou en programmant directement les visuels à l'aide de langages graphiques comme OpenGL. Néanmoins, cette programmation des interfaces est difficile et réservée à une minorité d'acteurs. Contrairement à des modèles ou à des environnements de programmation dynamique comme Squeak², qui permet à l'utilisateur de visualiser et de modifier les propriétés des objets graphiques ou d'inspecter le code, l'action de l'utilisateur pour simplement configurer les objets de représentation ou agir sur les propriétés structurelles reste très limitée.

4.3.2. Continuous GUI: ouvrir l'espace perceptuel et d'interaction de l'interface graphique

À l'aide de ces analyses initiales, nous pouvons synthétiser ces besoins pour lister un ensemble d'exigences et de principes pour le design de la continuité dans les interfaces graphiques.

² Squeak est une implémentation Open source et multiplateforme du langage de programmation Smalltalk. <http://www.squeak.org/>

4.3.2.1. *Explorer la conception d'espaces interactifs continus*

En accord avec le concept espace-formes [cf. 4.2.2.1], où l'important est la continuité de déplacement physique et perceptuel, nous avons privilégié une approche orientée espace [cf. 4.2.2.2] pour explorer la conception d'espaces numériques continus, supportant des activités multiples ou complexes.

Les espaces numériques doivent tout d'abord permettre un « adossement » de l'activité courante, au travers d'un « englobement », une protection perceptuelle et interactive du processus et de la tâche en cours, facilitant l'exécution des opérations et donc aussi l'externalisation cognitive et la planification des tâches futures (programmation de l'action). Ceci implique l'organisation locale d'un système de saillances reflétant l'organisation et les relations internes des structures de représentations, ainsi qu'une forte cohérence des interactions, tournées vers l'intérieur des espaces et économe en déplacements perceptuels et moteurs (interactions). Cette structure interne peut être matérialisée par les régularités de composition de formes obstacles hiérarchisées, objets et composants, formant des discontinuités structurées (ex. des espacements), organisant le sens de lecture, le mouvement et la continuité au sein de cette activité. Cette « protection » et cette « délimitation » de l'espace sont nécessaires à l'action locale — située — et à la mobilisation cognitive.

D'autre part, l'enjeu est de permettre à la fois la mobilisation de ressources multiples pour une même activité (voir exemple de transcription vidéo), mais aussi l'utilisation simultanée (coopérative) des applications pour mener parallèlement ou associer des activités multiples (cf. activités complexes du cockpit entremêlant plusieurs missions). Ceci nécessite une cohérence des représentations et une composition des saillances perceptuelles entre applications pour l'ensemble de l'interface, la possibilité d'organiser (associer, regrouper...) des éléments séparés en espace ou plutôt « place » d'activité(s) [Harrison 1996]. Il s'agit ici d'organiser un système de relations entre structures graphiques et de faciliter la navigation entre ces structures à l'aide de ces relations. L'architecture graphique de ces places d'activités doit être basée sur des principes d'ouverture, de système de circulation, de groupement (collections), de porosité ou d'aperture (filtre) des espaces internes, de modalités de plasticité (formation/déformation) entre objets et espaces graphiques, pour organiser la continuité graphique et interactive de l'interface.

Comment passer d'un espace, d'une place, d'une activité à l'autre ? Comment « reprendre » position dans et de cette nouvelle place au sein d'un dispositif d'« habitat » numérique ? Comment poser des marques pour y revenir, programmer l'information et l'action ? Comment organiser des espaces successifs et continus, spatiaux et temporels ? Comment matérialiser et ouvrir les limites pour aider à l'échange (passer de, passer vers, passer entre, accéder...) ? Comment agir avec des espaces multiples, accéder à distance ? Comment rendre poreux et traversables ces espaces, comment rendre « fluides » les transitions et « plastiques » les espaces ? Comment accroître la continuité de l'interaction ?

4.3.2.2. *Principes pour un Design de la continuité dans les GUI*

Issus des phases initiales d'analyse, nous avons identifié un premier ensemble de principes pour le design et l'instrumentation du concept de continuité dans les interfaces graphiques utilisateur. Cette liste n'est bien sûr ni exhaustive

ni définitive. Nous l'avons conçue comme une première approche, une liste d'« intentions » fournie en entrée de la phase de design du concept, qui devra être complétée ou reformulée.

[DP.1] : *Ouvrir les frontières entre fenêtres pour permettre la continuité visuelle et interactive dans l'espace du GUI*

[DP.1a] Permettre l'organisation de relations entre éléments de l'interface par le regroupement, la liaison, la composition, la répartition... des composants

[DP.1b] Construire des passages, ouvertures et espaces de transition, entre des processus et fenêtres séparés et opaques.

[DP.1c] Favoriser la flexibilité graphique des compositions, dans l'espace géométrique d'affichage, et dans l'espace temporel de l'usage.

[DP.2] : *Renforcer la cohérence des représentations pour assurer la continuité graphique et sémantique*

[DP.2a] Garantir des transformations géométriques et des comportements « plastiques » généralisés à l'écran de l'ensemble des formes (objets et composants) de l'interface. Rendre tangible, mesurable et contrôlable la position en Z des composants.

[DP.2b] Maintenir la cohérence visuelle et sémantique des objets, en rendant contrôlable par l'utilisateur le niveau d'abstraction des représentations et la continuité des transformations graphiques

[DP.2c] Augmenter les saillances visuelles, explicites et implicites, des objets d'intérêt en fonction des besoins (ex. particularisation graphique) ou de l'historique de l'usage (ex. feedbacks des usages)

[DP.3] : *Rendre poreuses les structures interactives pour faciliter la continuité d'accès perceptuel et d'interaction*

[DP.3a] Rendre traversables les structures graphiques

[DP.3b] Préférer le mode continu à la permutation pour l'accès (graphique et interactif) aux hiérarchies des structures

[DP.3c] Assurer à tous les niveaux d'accès de la structure une lisibilité des contenus et des propriétés.

[DP.3d] Privilégier un mode continu d'accès aux permutations discrètes. Rendre plus continue le « dépliement » de l'information et l'accès aux détails de représentation de type *progressive disclosure*.

[DP.4] : *Offrir à l'utilisateur des mécanismes de programmation de son action et de continuation pour faciliter la continuité temporelle des usages*

[DP.4a] Fournir des mécanismes d'expression et de réification des notions de lieu, chemin ou un sentier interactif dans l'interface graphique

[DP.4b] Permettre à l'utilisateur de poser et d'enregistrer dans les contextes logiciels des marqueurs graphiques (liens ou composants) permettant de convoquer des ressources ou de rappeler des usages.

[DP.4c] Mettre en place des mécanismes *réflexifs* [Tabard 2009] aux actions et usages de l'utilisateur, notamment concernant le paramétrage et navigation dans l'espace du GUI

Il est à noter que les deux groupes de principe DP.1 et DP.3 sont différents, et même partiellement « inverses ». Le principe d'*ouverture des frontières* ou limites (DP.1) adresse la continuité de relation *entre* composants au sein de l'espace d'interaction : passer de l'un à l'autre, considérer l'un depuis l'autre, joindre l'un à l'autre. Le principe de *porosité des structures* (DP.3) renvoie à la continuité d'accès *au sein* des structures : parcourir, traverser, préciser, augmenter l'information par un changement de niveau (de synthèse ou de détail), un « *dépliage* » de la structure.

4.3.2.3. Augmenter l'adaptativité graphique pour les utilisateurs et pour les concepteurs

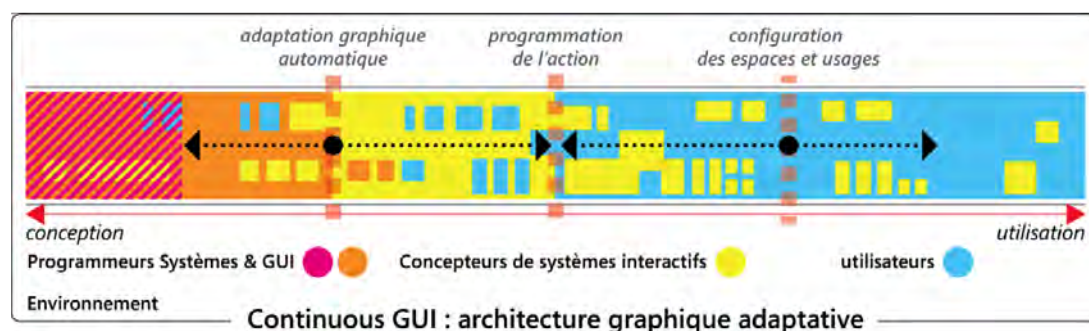


Figure 158 : Schéma de principe des parties prenantes du contrôle de l'affichage graphique de l'interface d'un « continuous GUI »

La Figure 158 présente le schéma de principe d'une distribution de la responsabilité des acteurs, programmeurs système, concepteurs, utilisateurs, telle que nous la voudrions dans l'affichage final de l'interface graphique d'un *Continuous GUI*. Cette représentation est volontairement très différente des deux schémas présentant la répartition actuelle dans le cockpit (cf. Figure 156) et dans les GUI (Figure 157).

Dans ce nouveau schéma (Figure 158), le contrôle des utilisateurs et des concepteurs sur l'affichage final est à la fois plus large (emprise de l'action possible) et surtout plus composite. Par exemple, la couverture très large du champ d'action de l'utilisateur (même non expert), depuis les couches bas niveaux de l'affichage, doit être rendue possible à travers la possibilité de composer de façon plus libre des fragments et composants graphique à l'exemple de Façades [Stuerzlinger 2006].

L'enjeu est de « rendre » à l'utilisateur la capacité de configurer, programmer et adapter de façon explicite ou implicite (par une réponse automatique du système à son action) son interface : configurer l'écran en espaces d'activités et conserver (sauvegarder) ces configurations pour des usages ultérieurs ; lui permettre de plus facilement programmer ses actions, par exemple en organisant plus librement les objets, containers et espaces ou en ajoutant des notations, comme autant d'externalisations cognitives ; pour les concepteurs de développer des mécanismes d'adaptation (architecturale) des formes et arrangements de l'interface pour répondre de façon implicite aux actions et usages de l'utilisateur.

4.4. Exploration de design de la continuité pour les GUI

Après cette longue phase préparatoire, plus théorique, nous avons pu expérimenter dans la pratique la continuité dans les interfaces graphiques, et conduire une exploration de design essentiellement basée sur le maquettage graphique — roughs, illustrations numériques, maquettage et prototypage — de techniques graphiques pour l'interaction.

4.4.1. Idéations

4.4.1.1. Ateliers habitats interactifs, phase 2

Une deuxième phase de l'atelier habitats interactifs a été organisée. Elle a regroupé une douzaine de participants sur deux séances. Le but était de réfléchir à l'organisation visuelle et interactive d'un dispositif spatial d'affichage 2D, de taille limitée, qui facilite la réalisation d'activités complexes ou mettant en œuvre des ressources, applications et outils multiples.

■ Focus Group : « un écran trop petit »

Dans un premier temps, les participants étaient appelés au travers d'une technique de brainstorming à identifier collectivement des questions et problèmes d'usage liés à une taille limitée d'affichage écran. La question posée était :

« Identifier/lister un ensemble de questions, difficultés, problèmes d'usage, engendrés par une surface trop réduite d'affichage »

Des idées listées pendant la discussion, ressortent globalement des problèmes de qualité d'usage de l'interface liés à la complexité des affichages courants et aux compromis nécessaires de composition à l'écran. Par exemple les problèmes de superposition imposés par l'ouverture simultanée de fenêtres et la *nécessité d'une taille suffisante* pour chacune d'entre elles, ou le parcours de contenus importants, qui nécessitent d'*incessantes interactions* de scrolling, déplacement et redimensionnement, ou de basculement entre fenêtres et écrans, de *switch entre applications*, qui engendrent des *problèmes de focus, d'interruption ou de partage attentionnels*, des *pertes de temps et des frustrations*. L'utilisation d'écrans multiples n'est *pas forcément une solution* [Bi 2009]. De plus, la place importante prise par les zones de contrôle des fenêtres, menus graphiques, outils, palettes, *laisse une taille trop réduite aux contenus* (ex. des surfaces écran prises par les palettes Illustrator, ou de la vision en mode édition d'une fraction trop limitée de la page sur Word). Un ensemble de questionnements sur la notion de fenêtre et de *rectangle* avec des volontés de *composition libre, comme avec des ciseaux, de petits bouts de fenêtres, de visualisations, de données...* à *assembler et manipuler comme je veux...* avec des références à OpenDoc [Curbow 1997], ou à Façades [Stuerzlinger 2006]. La notion aussi de surface globale, de zoom sémantique ou de maintien d'une visualisation *zoom et contexte*. Ont été évoquées de nombreuses références à la permutation entre applications (switch, exposé) avec des volontés de sauvegardes implicites et explicites de configurations écran (snapshot) permettant de revenir sur une configuration passée (historique), de naviguer entre ces configurations, voire de structurer ses activités et applications en configurations (par exemple avec un Finder ouvert au bon endroit).

Tableau 2 : Extrait des idées proposées

Titre	description de l'idée
Niveaux et épaisseurs continus-discontinus	une organisation en plans visibles des fenêtres et ressources avec une navigation en Z entre ces plans permettant de filtrer l'affichage écran
Fenêtre à débordement	proposer des vues en coupe (sur x et y) de la superposition des fenêtres avec un «débordement» permettant une vue du contenu et des interactions par exemple de groupement ou réorganisation
Historique Snapshot	prendre des instantanés (snapshot) de la configuration écran et les afficher dans un bandeau historique permettant la navigation rapide entre vues
Gommage d'interfaces	implicite : Les applications ou fenêtres non utilisées ou consultées disparaissent graduellement ; explicite : au sein d'une fenêtre/application/plan, je peux désigner des zones qui ne m'intéressent pas et éventuellement les faire disparaître ou perdre en résolution/précision (reconstruction graphique)
Navigation par tags, inspecteurs par liste	créer des tags graphiques éditables placés sur les décorations de fenêtre et une vue organisée de ces tags pour faciliter les interactions, notion d'inspecteur par listes de tags définis par l'utilisateur
liens espaces données	un drag & drop à partir du Finder permet d'ajouter des liens (répertoire, fichier) à un plan, par exemple sur le contour, et de l'ouvrir à la demande
Filtrage de l'information	un mécanisme de recherche ou sélection d'un mot ou objet m'indique les occurrences sur les autres plans
Sélection d'une partie fenêtre	sélectionner (copie ciseaux) une partie quelconque des fenêtres pour en faire un centre d'intérêt à placer dans les plans de son choix
Découpage de fenêtre	avec un ciseau virtuel (cf. couteau à pizza) on découpe une forme type polyline et la fenêtre s'adapte comme elle peut.
MoleView + fouiller/relever	Shift+molette pour creuser dans la couche en cours et atteindre - ou extraire - des parties/zones des couches suivantes ou précédentes Fouiller-relever : faire un trou, attraper, remonter la zone sélectionnée
Visu cylindrique	organisation des plans sur une vue cylindrique (contexte) permettant le focus sur la vue courante
Scrolling en profondeur	utiliser la molette ou une autre interaction pour parcourir rapidement la pile en «Z» des fenêtres
Archaeological glass	métaphore de l'archéologue qui explore des couches successives (spatio / temporelles) à l'aide d'un outil de type Tool glass
Mission Control	Créer un «dock» regroupant tous les plans sous forme de miniatures
La sphère (de contrôle)	Une sphère de supervision permet de visualiser et d'organiser l'affichage du bureau : deux axes x = temps, y = applications, en fonction du nb d'applis ouvertes la taille varie, en fonction du temps et des actions, la sphère tourne. On peut agir sur la position ou le focus des applis en agissant sur la sphère.
Association de fenêtres	Dans l'app switcher ou exposé, une sélection multiple de fenêtre ou vues (tout ou partie) crée une application virtuelle - plan d'activité
Alt+Tab filtré	navigation «augmentée» entre applications de type switch par l'application d'un filtre de recherche
Resize en Z	interactions «tirer», «pousser», glisser dessous/dessus pour modifier l'épaisseur et la position en «Z» des fenêtres
Scotch, pliages agrafage et piles	pouvoir plier une fenêtre et choisir la face visible ou scotcher /agrafer des fenêtres entre elles (positionnement libre non orthogonal) ou créer des piles de fenêtres déployables
fenêtres recto-verso	activité associant deux applications sans obligation de voir les deux ensemble = association explicite, Switch peu coûteux, rotation 3D
Contours transparents	pouvoir créer une zone de transparence sur certains contours application
Tube applicatif	créer un tube multi-niveaux (position statique écran) permettant de conserver des vues ou applications entre niveaux (adaptables au niveau)

■ Sélection et prototypage

À partir de ce brainstorming, il a été demandé aux participants de « *Produire un ensemble d'idées de conception pour la structuration graphique et interactive d'une interface utilisateur multi-activités* ». Chaque participant devait tout d'abord, individuellement, noter de façon simple sur Post-it le plus d'idées différentes de représentations et interactions graphiques concernant la création et la composition de « *plans d'activité* », la navigation entre ces activités et les interactions possibles entre plans et activités. Une phase suivante de recollection permettait d'explicitier et d'organiser sur tableau ces Post-It et de discuter collectivement des idées. Les post-it regroupés par thèmes ont été ensuite proposés au vote des participants pour une sélection collective des idées les plus intéressantes qui ont fait l'objet de prototypages en petits groupes.

Le Tableau 2 ci-contre présente un extrait des idées proposées au cours des deux séances et ayant fait l'objet d'une sélection.

4.4.1.2. Roughs d'exploration du concept de continuité

Suite à ces ateliers, nous avons réalisé une exploration graphique des concepts de continuité pour le GUI à l'aide de la technique de *rough*. Cette technique de création consiste à explorer ou proposer une solution graphique (forme, style, composition) par l'exécution d'esquisses (papier ou numériques) explicitant le visuel attendu. Nous présentons ici quelques-unes de ces réflexions graphiques.

4.4.1.2.1. Surface continue d'interaction pour le cockpit

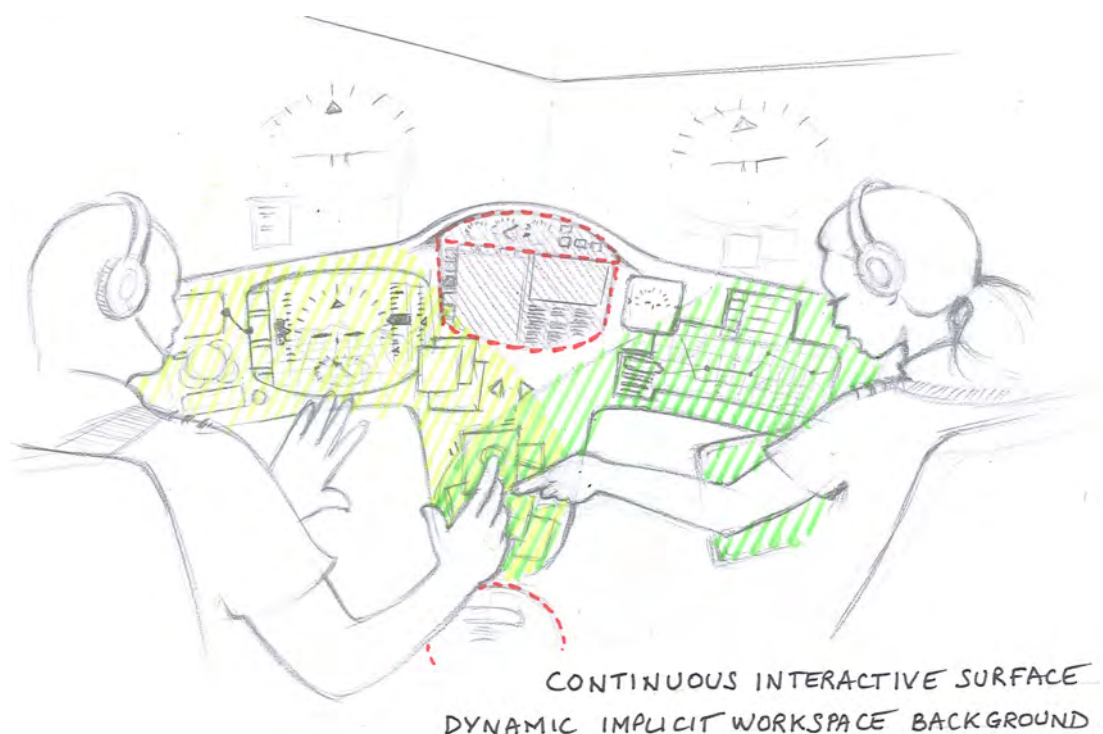


Figure 159 : Rough de principe d'une composition en zones PF et PNF du cockpit

La Figure 159 illustre la composition en zones pour une surface interactive continue pour le cockpit. Les zones hachurées en jaune et vert représentent

l'affichage de deux textures de fond différenciant sur la surface les espaces de responsabilité des deux pilotes Pilot Flying (PF) et Pilot Non Flying (PNF). L'emprise de ces zones est dynamique, le système adaptant de façon implicite leur géométrie aux actions des opérateurs. Les textures utilisent un hachurage complémentaire pour permettre la visualisation des zones partagées (ex. au centre en bas). Les zones cerclées de rouge correspondent à des zones statiques (ex. paramètres avion au centre en haut). Les vues essentielles, comme la vue synthétique (SVS) intégrant pilotage, navigation et supervision, sont semi-statiques (géométrie et contenus contraints). Des tablettes mobiles permettent d'explorer l'information et de générer des visuels qui seront déplaçables vers la surface d'interaction ou même sur le vitrage du cockpit, avec un affichage adapté et transparent.

4.4.1.2.2. Interface graphique multi-plans

La Figure 160 présente trois des roughs réalisés pour illustrer le concept d'interface graphique multi-plans. Les « plans » correspondent à des calques virtuels, superposés verticalement, et regroupant les fenêtres applications et ressources d'une activité (cf. Figure 160 en haut à gauche). Certaines applications, utilisées de façon transversale, conservent leur position sur l'écran entre plans, reprenant l'idée d'un tube applicatif. Le rough de haut à droite reprend cette idée sous forme topographique. ici les plans forment des niveaux (altitudes), et l'affichage écran résultant correspond à l'ensemble des reliefs visibles. Des « parcelles » de ces plans peuvent être modifiées en relief pour former des « saillances » ou des « retraits ». L'ensemble de ces reliefs, ou une section verticale sélectionnée (*view space*), serait projetés sur le plan d'affichage, comme schématisé par la Figure 160 en bas.

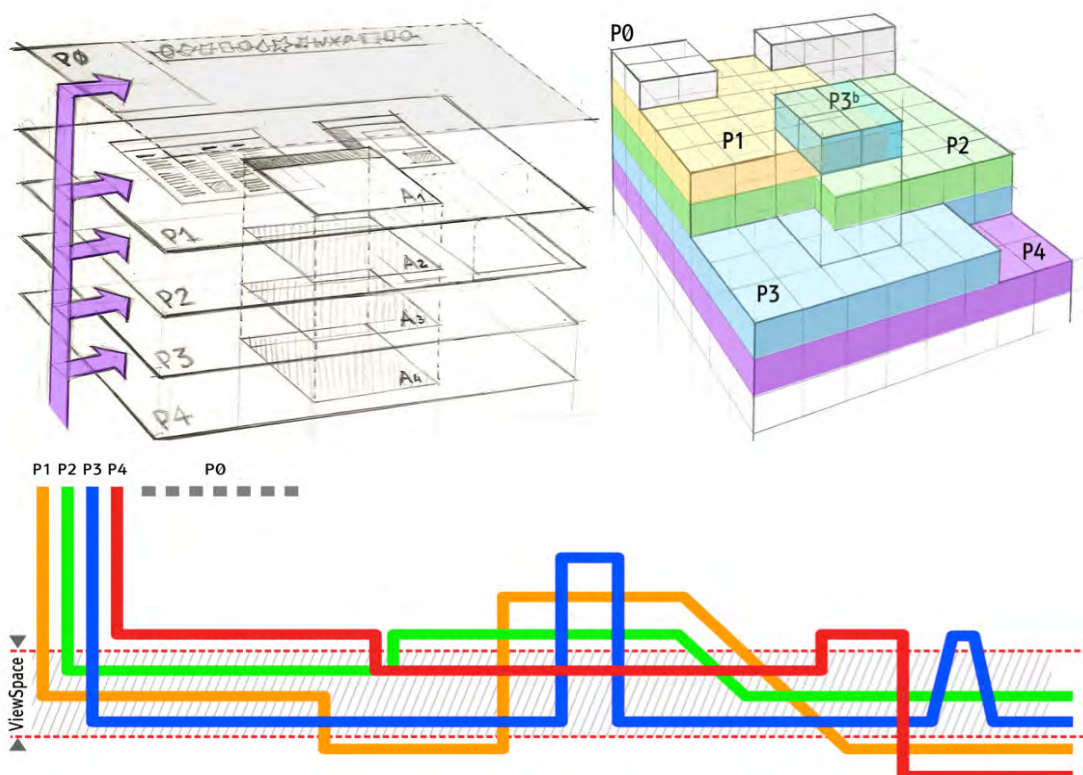


Figure 160 : Trois roughs illustrant le concept d'espace utilisateur multi-plan : plans superposés avec application multi-plans filtrée (en haut à gauche), réhaussement vertical d'une partie de plan (en haut à droite), relief multi-plans avec filtrage d'une tranche verticale (*view space*) d'affichage (en bas).

4.4.1.2.3. Generalized scrolling view spaces

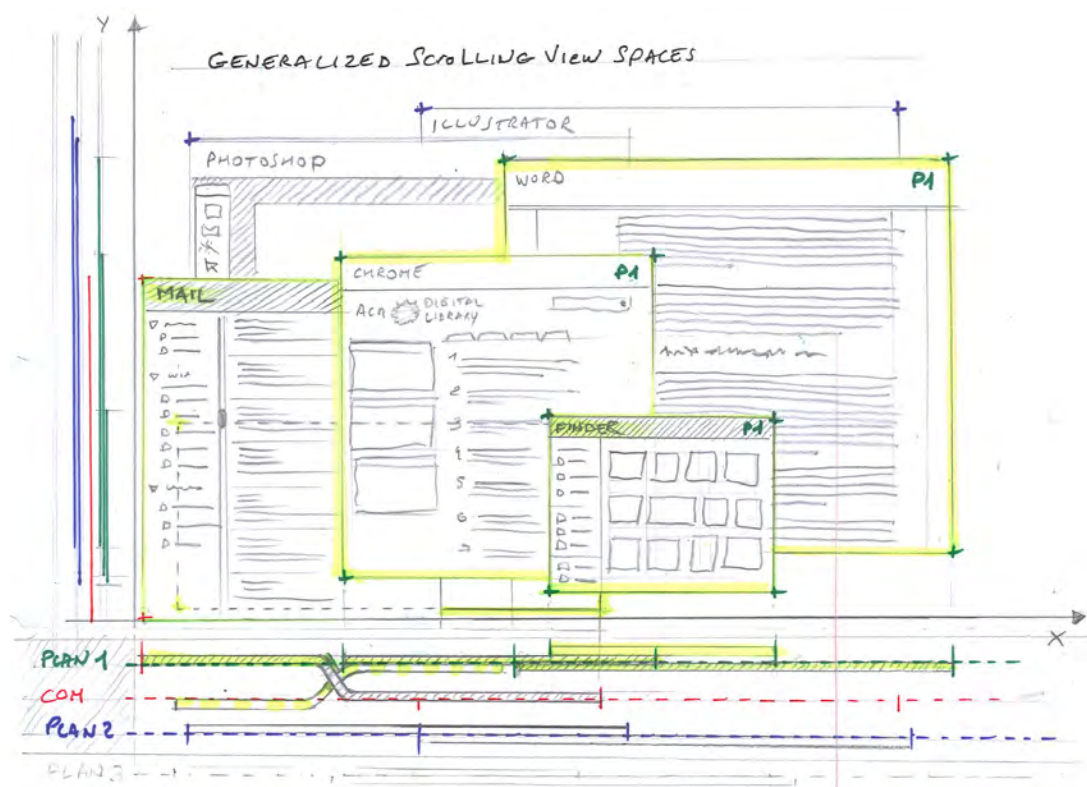


Figure 161 : Rough de principe d'une organisation des plans de travail à l'écran, contrôlable à l'aide de diagrammes (sliders) permettant de filtrer l'affichage et le focus

La Figure 161 illustre une implémentation possible de l'organisation de l'interface en couches ou plans d'activités. Les fenêtres et ressources sont regroupées et associées à un plan spécifique, qui peut être créé de façon implicite à l'exemple des applications de communication. Ces plans sont contrôlables par des interacteurs latéraux (horizontaux et/ou verticaux) de type diagramme, qui représentant la géométrie 2D et l'index en Z des composants sur l'interface. La manipulation des éléments du diagramme permet à l'utilisateur de réaliser ou modifier les groupements, d'agir sur la géométrie des composants, l'ordre d'affichage, ou de réaliser un filtrage de l'affichage des plans (ex. Plan 3 masqué sur le rough). Le rough montre un usage particulier du diagramme pour effectuer des « croisements » de plans (cf. le croisement entre plan COM et plan 1) permettant d'accéder visuellement à une fenêtre superposée par le plan actif (ou une section de cette fenêtre) en « remontant » sa position en « Z ».

4.4.1.2.4. Crossing Digital Places

La Figure 162 présente une illustration numérique d'un concept de « Place d'activités ». Cet espace dédié, « matérialisé » par une forme englobante (sorte de container libre au contour non clippant), s'organise comme un plan de travail de type PAO ou table de montage. La possibilité de configurer des gabarits (grilles) et repères de composition sur le plan, et d'utiliser des « feuillets » de composition positionnables librement et feuilletables, permet une composition organisée par blocs de documents (éditables), groupes ou listes de ressources, objets graphiques, liens... Ces feuillets sont composés sur des canevas librement définis par l'utilisateur. Des marqueurs « accrochés » à la bordure du container, permettent d'ouvrir des listes organisées de ressources du projet en cours.

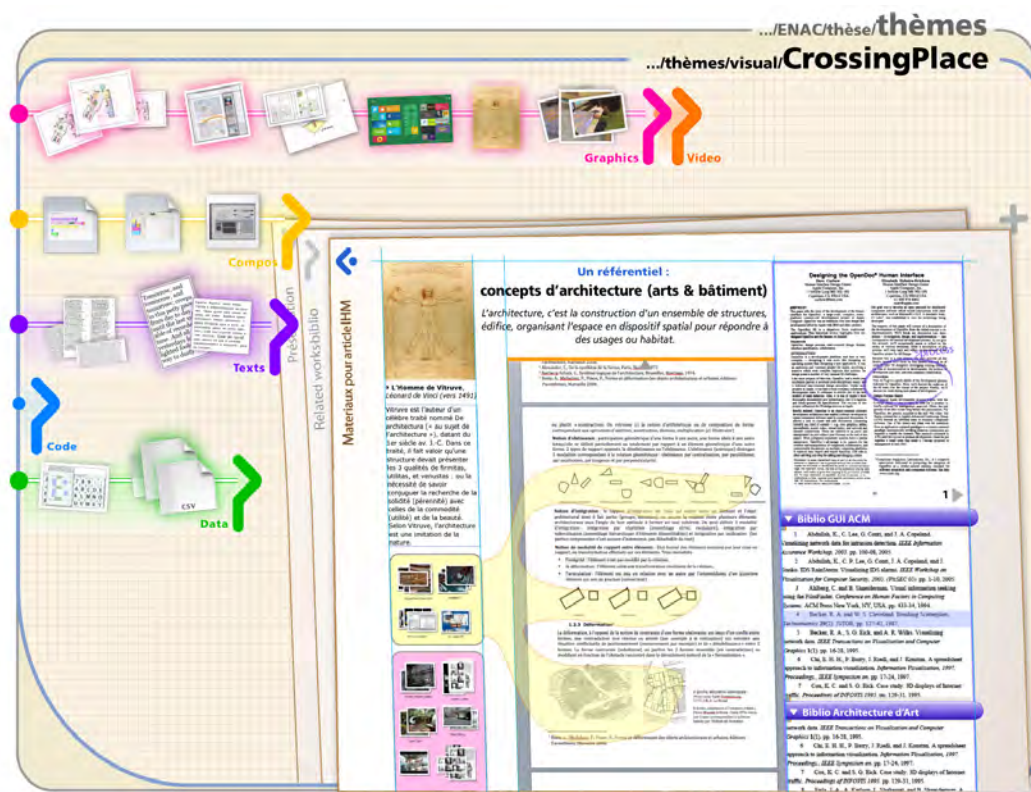


Figure 162 : Illustration numérique d'un concept de Place d'activités permettant le regroupement, l'organisation et l'édition de ressources

4.4.1.2.5. Crossing windows boundaries

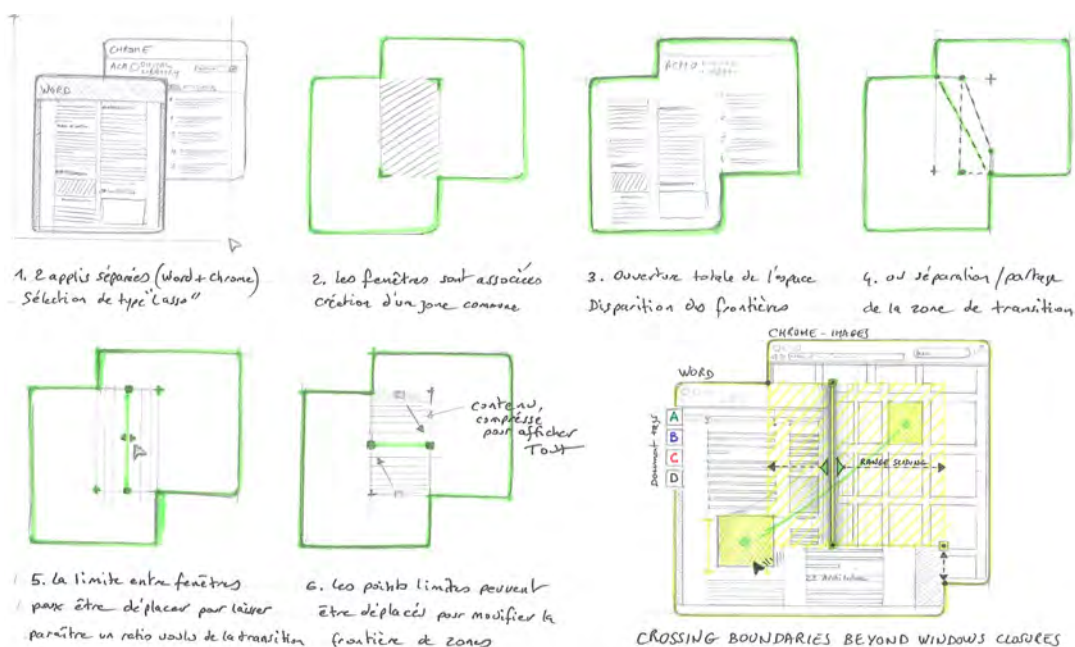


Figure 163 : Roughs de principe explorant une fonctionnalité d'association entre plusieurs fenêtres superposées, avec une zone de transition contrôlable.

La Figure 163 illustre un principe d'association de fenêtres superposées permettant de mieux accéder visuellement et partager les contenus. L'utilisateur associe les fenêtres (deux ou plus), par exemple par une sélection englobante, créant ainsi un composant « fenêtre composite ». Ce composant gère des méca-

nismes de transitions visuelles et interactives entre les fenêtres internes qui s'articulent notamment sur les limites (bordures) partagées et sur les zones de superposition.

4.4.1.2.6. Porous Graphical Structures



Figure 164 : Story-board numérique illustrant un accès continu au contenu de répertoires : expansion révélant et ouvrant progressivement le contenu.

La Figure 164 présente le story-board numérique d'un accès visuel et de déplacement continu dans un gestionnaire de fichiers aux contenus des répertoires. Le survol de la souris provoque une dilatation progressive de la représentation du répertoire accompagnée d'une apparition par transparence du contenu. Si le survol quasi-statique est maintenu le répertoire continue de s'ouvrir pour venir remplacer le répertoire existant et permettre une nouvelle exploration. Une annulation est néanmoins possible pour revenir en arrière et refermer le sous-répertoire sans interrompre l'interaction. Cet accès continu à la structure graphique est différent des mécanismes de navigation continue par exemple du Finder Mac qui fait basculer l'affichage des niveaux hiérarchiques lors du survol maintenu d'une icône de répertoire. Ici, la découverte des contenus est progressive permettant de parcourir les « passages » pour mener une exploration visuelle sans perdre le contexte.

4.5. Implémenter la continuité dans les interfaces graphiques

Après cette phase d'idéation (ateliers et roughs) nous avons pu rédiger des scénarios de conception visant à implémenter le concept de continuité dans les interfaces graphiques. Cette implémentation a été réalisée au travers de prototypes : maquettes numériques non fonctionnelles et prototypes fonctionnels illustrant une mise en œuvre du concept dans les interfaces graphiques. Nous avons centré ces « expérimentations » de design sur les principes de *limites* et de *passages* entre composants et structures graphiques. Nous présentons ici une maquette concernant les interfaces du cockpit, puis quatre prototypes logiciels situés dans le contexte des interfaces graphiques *End-User*. Il s'agit d'explorations, qui ne sont pas le résultat de processus de conception formalisés, itératifs et validés avec des utilisateurs.

4.5.1.1. Espace graphique et interactif continu pour le cockpit

Le premier exemple traite de la problématique des interfaces du cockpit. Nous présentons ici une maquette de principe basée sur les nouveaux concepts cockpit de surface interactive continue. Ce travail autour du concept de continuité des interfaces pour le poste de pilotage avion sera développé dans le cadre de projets futurs sur le cockpit intégrant sur une plateforme d'exploration tactile continue des affichages numériques et des dispositifs physiques.



Figure 165 : Illustration numérique d'une composition libre des informations sur la zone PNF (Pilot Non Flying) de la surface interactive du cockpit pour explorer une solution à un problème de vol.

La Figure 165 présente une maquette numérique d'exploration d'un concept de « *Creative Fly Deck* ». Cette maquette illustre la possibilité de composer de façon très libre une partie de la surface interactive continue d'un cockpit du futur. Ici, nous sommes sur le côté droit du cockpit, correspondant à la zone d'usage du PNF (Pilot Non Flying). Le pilote non en charge directe de l'action de pilotage explore un espace de solution visant à résoudre un problème de vol. Cette situation correspond au scénario suivant :

Scénario 1 : « creative fly deck »

En vol au-dessus du Pacifique, l'équipage fait face à une situation imprévue. La météo très perturbée secoue fortement l'avion que la foudre a déjà touché 2 fois. Les pilotes ont relevé des incohérences sur les informations avions affichées par les pages système, notamment concernant les vitesses dont les valeurs semblent évoluer de façon erratique. Ils décident de maintenir au mieux la sécurité du vol tout en cherchant une solution au problème.

Leur avion est équipé d'une interface cockpit de type « creative fly deck » avec une surface interactive unique en « T ». La surface continue leur permet de composer en partie librement les informations et outils sur la surface interactive. Ils peuvent ainsi dupliquer, si besoin, des composants systèmes ou des parties de pages écran pour les réorganiser à volonté, définir le niveau de visualisation

de chaque sous-système... le système garantissant le maintien et la saillance visuelle des données critiques et la cohérence globale. L'identification des rôles des pilotes (PF et PNF) avec une gestion dynamique en zones d'intérêt sur la surface unique permet de garantir la sécurité du vol, la réalisation des procédures et de favoriser la coopération, tout en offrant une certaine « privatisation » des espaces.

Pendant que le pilote en charge du pilotage (PF) se concentre sur les tâches de pilotage, le co-pilote (PNF) se consacre à l'exploration du problème ; il réduit la partie « suivi du pilotage et supervision » sur le côté gauche de sa zone, diminuant ainsi légèrement le niveau de détail, et utilise largement la surface restante pour examiner la situation. Il crée une « place » dédiée, matérialisée par un cercle sur l'interface, et y ouvre un ensemble de vues : vue de surveillance de certains paramètres réalisée par copie de fragments de pages systèmes, documentation technique, guide de procédures et de cartes de navigation. Il regroupe certaines vues en blocs et connecte par des liens visuels certaines informations qui lui semblent plus pertinentes. Il ouvre aussi un espace spécifique de notation pour externaliser sa réflexion. Il peut également s'il le veut annoter librement la surface tout entière avec un système de calques superposables à l'interface. Cette place dédiée lui permet de disposer et parcourir plus facilement la documentation, de prélever, enrichir et structurer l'information voulue, en coopération avec une équipe de maintenance au sol qu'il a sollicité, et qui partage visuellement son espace de travail, et d'explorer graphiquement des espaces de solutions. Il peut intervenir sur la zone d'échange centrale pour déposer des ressources et même sur la zone dédiée du pilote pour annoter des estimations, et transmettre des instructions. Le système lui permet de déplacer des ressources, par-delà les limites physiques de la surface d'affichage vers une zone quelconque autorisée de la surface interactive ou vers le bas du vitrage avant, par une interaction gestuelle traversant les bords de la surface.

Ce scénario, illustré par la Figure 165, s'intéresse au rôle du co-pilote (PNF) et à une situation très particulière d'un problème de vol non identifié. L'activité que doivent conduire les pilotes dans des situations critiques ou dégradées correspond à un processus d'abduction, c'est-à-dire un raisonnement permettant d'expliquer la situation à partir de faits observés et de la formulation d'hypothèses en rassemblant, testant, éliminant ou en cherchant la cohérence d'un ensemble de signifiants [Conversy 2014]. Ceci implique une forte adaptativité de l'espace interactif permettant de « mobiliser » les ressources de l'interface pour supporter une réflexion collaborative des pilotes et la résolution rapide du problème.

Ce type d'usage plus libre de l'espace et des informations du cockpit n'est pas uniquement utile pour des cas critiques ou extrêmes [Conversy 2014]. Des situations de pilotage plus régulières ou *nominales*, comme une modification de la navigation ou des objectifs de mission suite à un problème météo ou de trafic, la préparation d'une phase d'atterrissage sur un aéroport mal connu, la gestion d'un problème de maintenance, ou plus simplement la planification ou la programmation d'actions futures pourraient utiliser le même type de mécanismes.

4.5.1.2. Représentation adaptative pour une interface multi drones



Figure 166 : Projet D2COS, spécification graphique de 2 niveaux de représentation sémantique des informations vol (à gauche), transformation interactive continue entre les deux niveaux (à droite).

Dans le cadre du projet D3COS [D3COS], une interface prototype de station de contrôle sol de drones multiples a été réalisée au laboratoire LII de l'ENAC par M. Magnaudet, qui vise à remplacer l'interface utilisateur du projet open source Paparazzi³. Ce prototype développé avec le Framework *djnn* développe des concepts d'architecture logicielle adressant la notion d'adaptation [Magnaudet 2014]. J'ai contribué à un prototype de la station sol pour une partie graphique concernant les représentations plan de vol des drones. Plus spécifiquement il s'agissait de spécifier graphiquement une adaptation interactive entre deux niveaux sémantiques de présentation des données. La Figure 166 présente à gauche la spécification SVG des deux états de représentation graphique, et à droite un montage réalisé à partir d'images écran de l'interface de l'animation graphique de transition opérée entre ces deux états. Cette transition graphique et l'animation du rendu associée sont contrôlées par le système, à partir d'une interaction de réduction de la barre latérale ou d'une « demande » système (par ex. mise en saillance), mais sont également contrôlables par l'utilisateur par une interaction gestuelle continue de type slider.

Cet exemple utilise la notion de forme et déformations (voir 4.2.2.3) et illustre l'implémentation possible de la notion de continuité des représentations, au travers des mécanismes d'adaptation graphique à la surface d'affichage disponible.

4.5.1.3. « Rapprocher » l'objet pour garantir l'accès

La Figure 167 illustre la nécessité de maintenir une continuité d'accès à la perception mais surtout à l'interaction aux objets et structures graphiques de l'interface. Cet exemple, issu d'un travail publié à UIST'07 avec Raynal et Truillet [Raynal 2007] a été recodé en java avec le framework *djnn*. L'image de gauche montre un fonctionnement standard : la taille suffisante d'affichage du clavier logiciel ne nécessite pas de vue *fish-eye*.

³ Paparazzi est un système Open source concernant les micro-drones conduit par l'ENAC (composants matériel et logiciels libres) permettant de faire naviguer de façon autonome un ou plusieurs avions contrôlés par une station sol. <http://wiki.paparazziuav.org/>

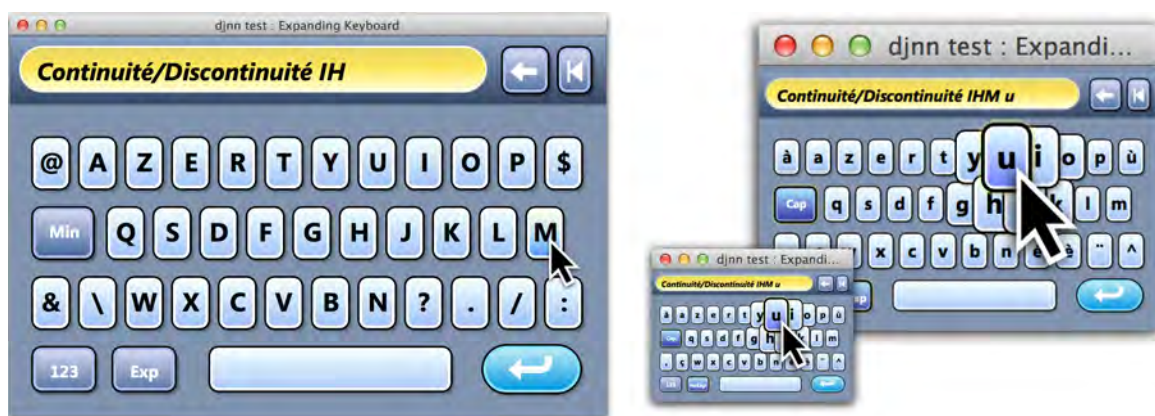


Figure 167 : Expanding Keyboard, mode sans expansion (à gauche), mode expanding target déclenché automatiquement suite à une réduction de la taille de fenêtre de l'outil pour garantir l'interaction (à droite) vues à tailles « réelle » et agrandie.

L'image de droite de la Figure 167 (taille « réelle » et image agrandie à l'arrière-plan) montre un fonctionnement en mode « Expanding », déclenché de façon automatique avec la réduction de la fenêtre applicative ou activé/désactivé de façon explicite (touche clavier « Exp »). Dans ce mode *Expanding Target* [Mc Guffin 2002], les touches à proximité du curseur subissent un effet *fish-eye* avec un réarrangement de l'ordre d'empilage des touches, afin de garantir à la fois, un bon accès visuel à l'information (le label de la touche) et la performance de l'interaction. Ainsi la taille d'affichage pixel du clavier sur l'image de droite qui est de 430×278 px correspond sur l'écran Rétina utilisé à une diagonale physique de 42×27 mm pour plus de 40 objets graphiques, soit une taille « normale » de touche de 2×3 mm et de 6×8 mm en taille « zoomée » maximale.

Cet apport du concept de continuité pour maintenir l'utilisabilité des interfaces graphiques, déjà assez largement étudié, répond de façon plus cruciale aujourd'hui à une augmentation continue de la résolution des écrans, qui permet une meilleure lisibilité des objets visuels malgré une taille physique d'affichage très réduite, mais qui peut aussi engendrer des problèmes pour l'utilisateur d'interaction avec ces objets. Ainsi, le prototype présenté permet un redimensionnement libre de la fenêtre, associé à une adaptation continue de l'outil à la géométrie de la fenêtre. Avec un écran de forte résolution, l'utilisateur peut assez fortement réduire l'outil pour conserver le maximum du contexte. Le scénario suivant illustre son emploi.

Scénario 2 : « Embedded keyboard »

Pablo en déplacement rédige un article pour CHI sur sa tablette « Wacom Cintiq 13HD ». Sans clavier physique disponible, il utilise un clavier virtuel avec son stylet. Pour travailler plus confortablement, il a mis son application Word en mode plein écran avec un affichage pleine largeur du texte. Il utilise un clavier logiciel fish-eye, zoomable à volonté et qui s'interface avec l'application de traitement de texte. Pablo positionne le clavier sur la colonne du texte en cours d'écriture et ajuste sa taille. La réduction du clavier en dessous d'un certain seuil a enclenché automatiquement le mode « Expanding keyboard » qui transforme de façon continue les touches proches de la pointe du stylet pour augmenter leur taille d'affichage

et faciliter l'interaction. De plus, l'intégration logicielle du clavier avec l'application permet une fonction de saisie continue : la ligne de texte en cours de saisie, formant comme une bande de papier, se déplace sous l'encoche du clavier semi-transparent (un peu comme la feuille de papier d'une machine à écrire placée sur un chariot mobile), pour garder le curseur d'insertion centré par rapport au clavier. Une fois la ligne complétée, le nouveau texte est intégré dans la colonne et c'est le document tout entier qui se déplace sous le clavier par une action de scrolling contrôlée du texte pour présenter une nouvelle ligne vide de saisie dans l'encoche sans que le clavier virtuel se déplace. Pablo peut s'il le souhaite se déplacer dans le texte à partir de touches spéciales du clavier, se déplacer dans le document Word ou déplacer le clavier logiciel et modifier le point d'insertion dans le texte.

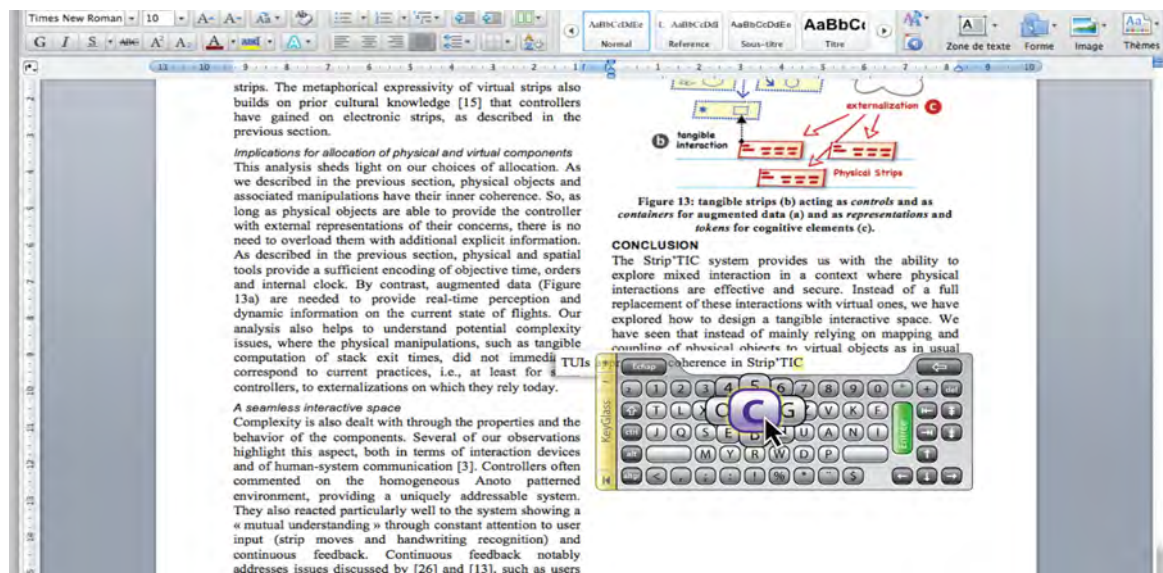


Figure 168 : Illustration de l'usage d'un clavier logiciel intégré à Word, librement redimensionnable par l'utilisateur, avec fonction fish-eye, et produisant une interaction en proximité et en continuité de la saisie.

La Figure 168 présente un exemple d'usage intégré du clavier fish-eye décrit par le scénario 2. Ici, le clavier logiciel est utilisé avec une application de traitement de texte (Word). La co-adaptation logicielle entre les deux applications est une bonne illustration du principe de continuité. Ce prototypage illustre la notion de heurts perceptifs (voir 4.2.2.1) et propose d'augmenter la saillance visuelle et l'accès à l'objet en le « rapprochant » visuellement et interactivement de l'utilisateur. Sont utilisés ici, et à la fois, le principe de discontinuité permettant un accès plus « saillant » de l'objet cible, et le principe de continuité de la visualisation *Focus+Context* qui permet l'affichage d'un clavier intégral malgré la réduction de la taille de l'outil. La relation de couplage entre application et outil est un exemple du principe de *passage* de la continuité entre composants de l'interface.

4.5.1.4. Augmenter les limites pour favoriser l'accès aux ressources

Cette exploration des principes de limites et de passages utilise une transformation des bordures de fenêtres pour lier des ressources externes à une fenêtre applicative pour faciliter l'édition d'un document.

Scénario 3 : « Augmented Boundaries »

Pierre rédige un livrable de projet concernant un état de l'art technique des interfaces du cockpit. Il édite son document avec Word et doit insérer de nombreuses images, issues de plusieurs études, pour illustrer le rapport. Les images ont été rassemblées pendant la phase d'analyse et organisées hiérarchiquement dans des répertoires dédiés.

À partir de son Finder, Pierre visualise les répertoires intéressants pour son livrable et utilise une nouvelle fonction du GUI pour associer ces répertoires à son éditeur de texte. Par un simple geste de Drag & Drop initié sur un répertoire, il déplace une copie de l'objet répertoire vers la fenêtre Word. À l'approche de la bordure de la fenêtre, un feedforward lui indique qu'il peut déposer l'objet copié pour créer un marqueur du répertoire associé à la fenêtre. Pierre ajuste la position sur la bordure gauche de la fenêtre Word et termine l'interaction pour créer le marqueur. Le GUI modifie alors la bordure de fenêtre, créant à la position d'insertion une sorte de « cartouche », contenu dans l'épaisseur même de la bordure élargie à cet endroit. Ce cartouche en mode marqueur ne contient qu'un seul objet graphique représentant le répertoire associé avec un label minimal «A» et une couleur de fond choisie automatiquement sur un nuancier ad-hoc. Pierre crée ainsi 3 marqueurs correspondant aux données images qui l'intéressent. Pendant sa tâche de rédaction, le simple survol de l'un des marqueurs crée un effet de type «expanding target», dilatant le cartouche pour révéler les fichiers contenus. Pierre peut ainsi, par une interaction continue, ouvrir le cartouche pour visualiser globalement les fichiers contenus, naviguer par un geste vertical provoquant une dilatation supplémentaire du fichier survolé pour mieux les visualiser, sélectionner un fichier à insérer et venir le déposer/copier dans son texte. Il peut également agir sur un marqueur pour le conserver ouvert et même dans ce cas, changer sa taille et sa disposition par rapport à la bordure pour faciliter son emploi.

La Figure 169 présente une séquence d'images écran issues d'un prototype fonctionnel réalisé en Java avec *djnn*. le prototype, qui a un but illustratif, offre des fonctionnalités très limitées. La vue a. de la Figure 169 montre un état initial avec trois fenêtres : deux pseudos Finder et un pseudo Word (contenu principalement recréé par composition d'images). La vue b. illustre la création, à l'aide d'une interaction de drag&drop sur un objet répertoire de la barre de favoris du finder « Architectures », d'un *marqueur* (tag de répertoire) sur la bordure gauche de la fenêtre de traitement de texte. Le marqueur créé est dans son état fermé avec un simple label alphabétique et une couleur choisie dans une liste de couleurs prédéfinies. La vue c. montre la création d'un deuxième marqueur correspondant au répertoire « Aeronautics ». La vue d. montre l'état ouvert du marqueur, après une interaction de drag sur un coin bas du marqueur, présentant le contenu du répertoire sous la forme d'une liste de fichiers : miniatures + label des fichiers images. La vue e. montre un effet d'*Expanding Target* zoomant et empilant les miniatures au survol des fichiers. Enfin la vue f. présente une interaction, réalisée par un drag & drop opéré sur l'une des miniatures survolées, permettant de copier ou déplacer le fichier image sélectionné vers l'application de traitement de texte.

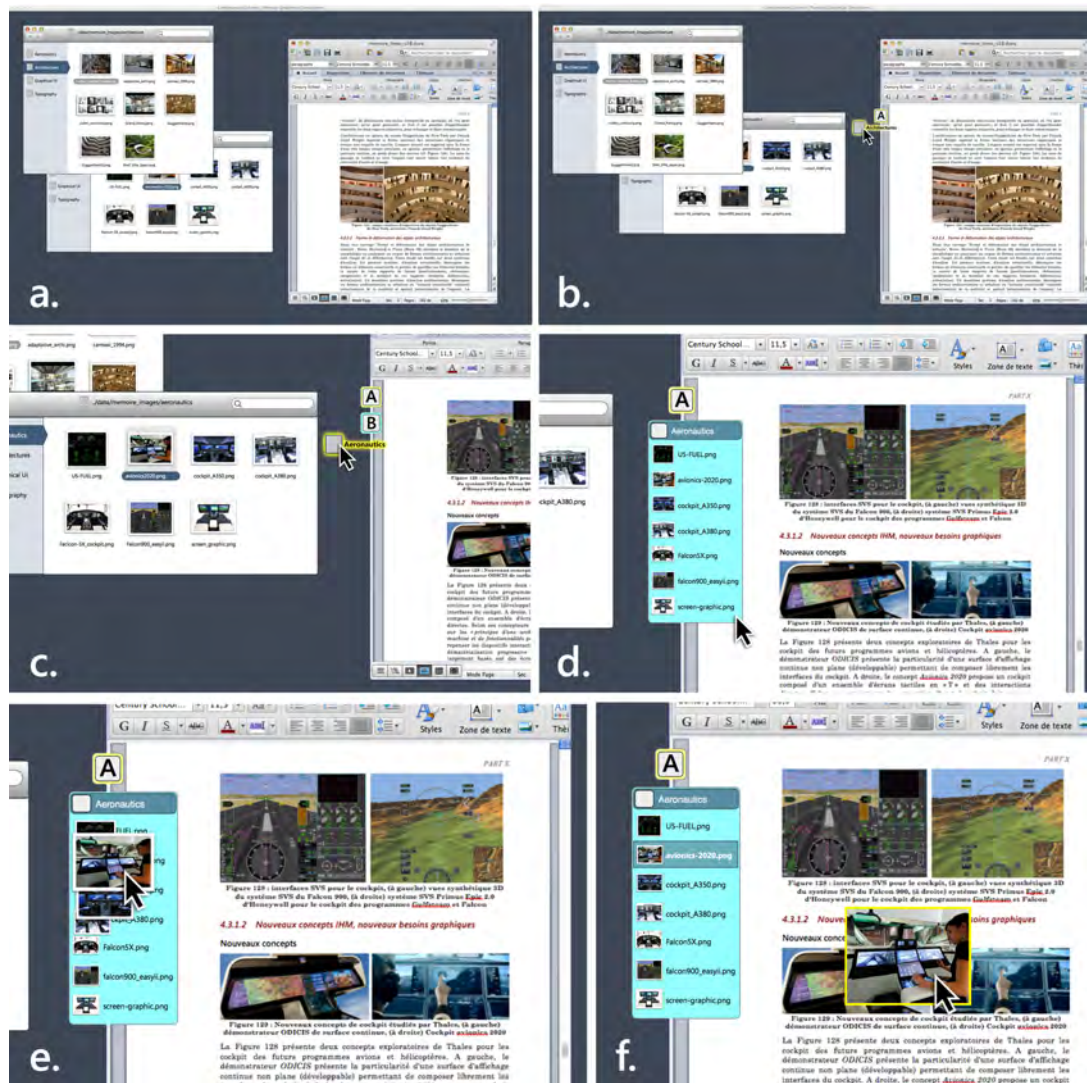


Figure 169 : Augmented Boundaries, premier prototype semi-fonctionnel, a. 3 fenêtres applicatives (2 pseudos Finders, 1 pseudo Word), b. le drag&drop d'un objet répertoire est utilisé pour créer un marqueur sur la bordure du traitement de texte, c. ajout d'un deuxième marqueur (répertoire « Aeronautics »), d. ouverture du marker, e. parcours des images du marker avec effet expanding, f. drag&drop de l'image sélectionnée vers le texte.

Ce prototypage illustre de plusieurs façons le concept de continuité. Continuité entre applications et ressources par l'association de ressources, ici un ensemble de fichiers images, à une application/document. Dans l'exemple présenté, l'idée est de pouvoir insérer des ressources externes à l'application, et d'enregistrer cette configuration de marqueurs/ressources avec la fenêtre applicative ou avec le document édité par cette application. L'insertion des marqueurs à la bordure même de la fenêtre correspond à un deuxième type de continuité, géométrique et de composition, entre fenêtres, avec la possibilité d'agir librement sur le lieu (frontière) d'insertion et sur la géométrie précise de composition (mode ouvert du marqueur). Enfin, l'interaction qui commence par un parcours des ressources est augmentée avec un effet de type *Expanding target* des représentations, qui peuvent inclure des groupes ou répertoires déplaçables, puis de sélection-copie-dépose dans l'application dans une même interaction. Ces deux moments illustrent chacun l'apport des continuités perceptuelles et interactives pour l'accès aux structures graphiques de l'interface.

Ce prototype illustre également la notion de limites et passages. Il propose d'utiliser la limite elle-même (bordure) pour stocker des informations mises

en relation à la fenêtre applicative (à l'image du boa avalant un éléphant du *Petit prince*). Il propose aussi d'ouvrir des passages de traverse, au sein du cartouche et du cartouche aux espaces internes de la fenêtre.

4.5.1.5. Construire des passages par-delà les frontières applicatives

Scénario 4 : « Windows Transitions »

Marie est chercheuse, elle réalise la transcription d'une séance de conception réalisée avec des utilisateurs. Pour ce faire, elle utilise conjointement 4 applications : iMovie pour visualiser la vidéo de la séance, LiveScribe pour parcourir ses notes écrites et sonores réalisées avec son stylo Anoto, TextEdit pour créer son document de transcription (texte + images) et une fenêtre Finder pour gérer les ressources. Marie utilise son «vieux» portable Mac dont la résolution écran plutôt faible l'oblige à composer assez précisément l'affichage des fenêtres et à opérer des basculements incessants entre ces applications. De plus comme la transcription est longue, elle doit pouvoir interrompre son travail pour répondre à des sollicitations ou visualiser les mails entrants par exemple.

Son GUI lui permettant d'organiser cette activité sous la forme d'un espace dédié : Marie commence par ouvrir les applications avec les bons paramètres et ressources. Elle les organise au mieux sur le plan de travail, avec une taille suffisante pour interagir confortablement avec les contenus, produisant ainsi de larges superpositions entre fenêtres. Ce premier placement réalisé, elle associe ces applications par une simple interaction de sélection multiple (lasso de sélection). Cette interaction crée un composant multi-fenêtres visualisé par contour externe coloré englobant les fenêtres sélectionnées, ainsi qu'une réification des zones de bordure limites entre fenêtres. Elle donne un nom à ce plan d'activité en accédant à une vue des propriétés de la structure (sélection maintenue sur la limite externe), et enregistre ce nouveau plan. Elle pourra fermer l'ensemble du plan si besoin et le rappeler ultérieurement dans l'état exact de chacune des applications à sa fermeture (continuation).

Marie peut ensuite agir dynamiquement sur les limites internes entre fenêtres du plan pour modifier les transitions entre zones superposées. Le déplacement des limites ou d'une zone délimitée de ces limites (création de points de césure) permet de déplacer cette limite à l'intérieur de la zone superposée pour modifier la visualisation de la zone en superposition : vue partagée entre les deux contenus ou même déformation des deux contenus pour permettre une visualisation compressée de l'ensemble des contenus. L'association logique des fenêtres en processus d'activité permet de distribuer un focus à chacune d'entre elles. Ce qui permet d'afficher et d'agir de façon permanente sur les contrôles visibles, par exemple les contrôleurs de navigation de LiveScribe ou d'iMovie. Ceci permet aussi de contrôler globalement ce focus en préservant la structuration visuelle courante des fenêtres, informations et outils, non seulement en cas de brèves interruptions comme pour répondre à des mails, mais aussi de suspension plus longue comme une reprise ultérieure de son travail.

Maquettage non fonctionnel

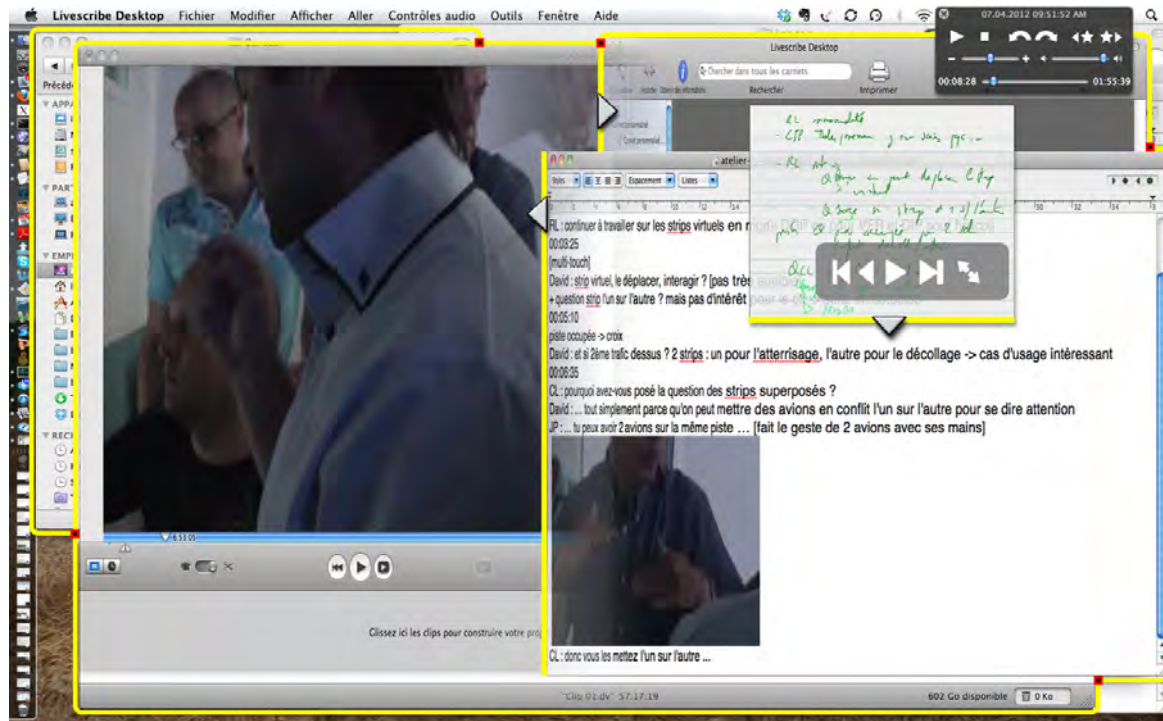


Figure 170 : Une première illustration du scénario 4 « Windows Transitions » maquettée avec PhotoShop

La Figure 170 présente un prototypage rapide et non fonctionnel, réalisé avec PhotoShop à partir de copies d'écran pour illustrer le scénario 4 : *Windows transitions*. Les quatre applications ont été regroupées en un espace de travail unique (symbolisé par le contour externe en jaune). Des Limites, verticales ou horizontales ont été créées entre fenêtres : représentées par un trait jaune de séparation avec un curseur triangulaire de manipulation. Des points nodaux (en rouge) situés sur ces limites permettent de modifier la largeur d'action de ces limites.

La Figure 171 présente un story-board de principe, réalisé avec Illustrator du principe de transition contrôlée par l'utilisateur de la zone de superposition de deux fenêtres associées. Les vues 2 à 4 illustrent l'effet graphique attendu d'une interaction de répartition de l'affichage des contenus, contrôlée par l'utilisateur par un drag sur la zone limite entre les deux fenêtres de la zone de transition. Une transformation adéquate de compression géométrique permet de visualiser l'ensemble du contenu de chacune des parties superposées.

Windows Tansitions

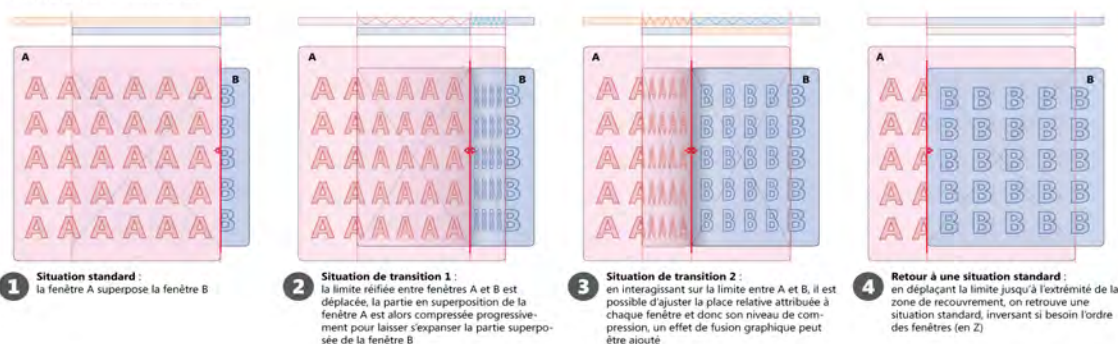


Figure 171 : Story-board numérique illustrant le principe de transition entre les contenus de deux fenêtres superposées

Prototypage fonctionnel : première itération

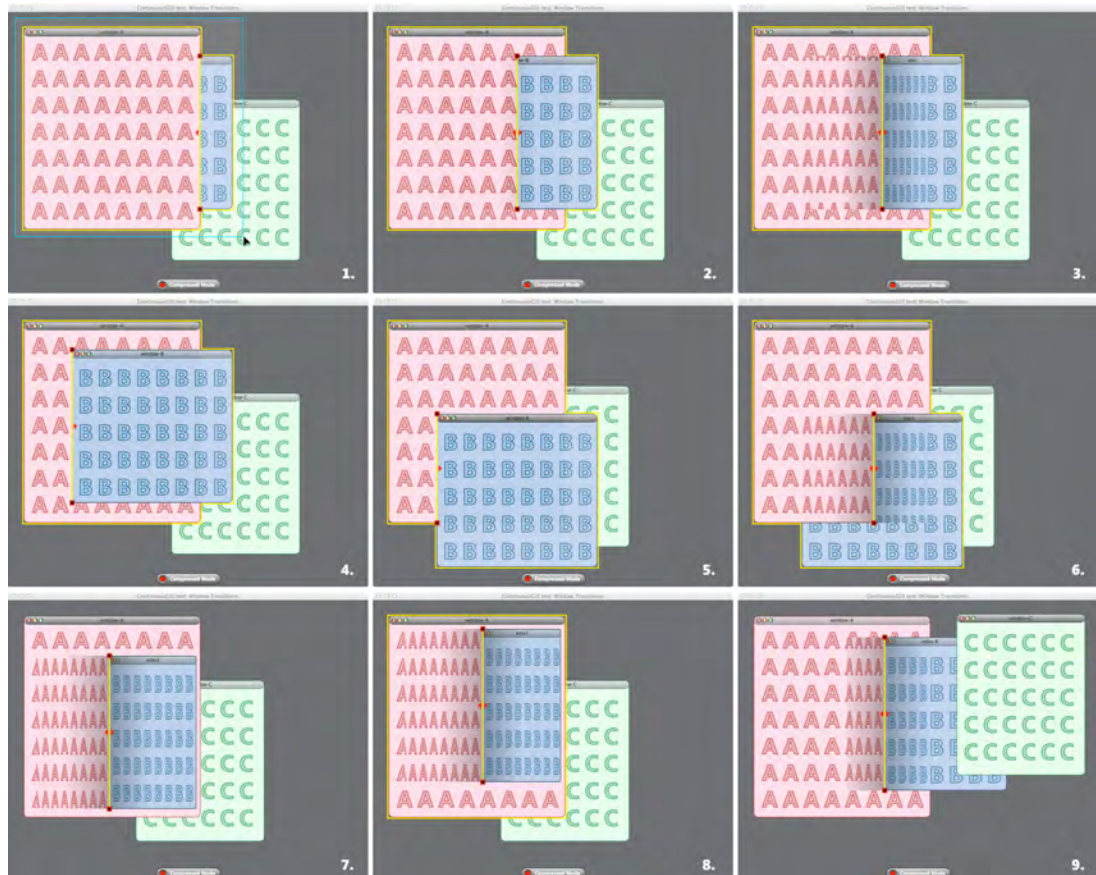


Figure 172 : Premier prototype fonctionnel de *Windows Transitions* réalisé avec *djnn*

La Figure 172 a été réalisée à partir de copie écran d'un premier prototype fonctionnel du concept de Windows Transition. Ce prototype a été codé en java avec le framework *djnn* [Magnaudet EICS'14].

Les vues 1 à 6 de la Figure 172 présentent une interaction de transition :

- Vue 1.** l'utilisateur crée une transition en sélectionnant deux fenêtres (A et B) par une action de sélection (rectangle englobant). Un feedback de contour associe les fenêtres composant la transition. Un interacteur limite est créé sur la zone de contact entre les deux surfaces, avec deux poignées externes permettant de modifier la portée de la zone de transition (réduire la largeur de la partie commune affectée par le partage visuel), un curseur central affiche les directions possibles de manipulation de la transition.
- Vue 2.** Une interaction latérale de drag, initiée à partir d'une zone de picking englobant la limite, modifie la répartition de l'affichage des deux zones superposées dans la zone de transition entre les deux fenêtres, laissant apparaître une partie couverte de la fenêtre B.
- Vue 3.** Un changement du mode de fusion permet à l'utilisateur de basculer la représentation entre un mode *vue partagée* et un mode *vue complète* qui transforme (compresse) les deux contenus superposés pour afficher l'ensemble des informations des deux fenêtres.
- Vue 4.** Le déplacement à l'extrême gauche de la zone de transition du curseur central révèle entièrement la fenêtre B, située au-dessous de la fenêtre A.

- Vue 5.** Le déplacement libre de l'une des deux fenêtres, ici de la fenêtre B, modifie dynamiquement la zone de transition entre les deux fenêtres, adaptant sa limite et ses poignées de portée, ainsi que la vue composée des deux fenêtres dans cette zone.
- Vue 6.** Le déplacement de la limite provoque un effet de vue encochée en coin des fenêtres A et B.
- Vues 7, 8.** Un nouveau déplacement de la fenêtre B, à l'intérieur de la fenêtre B, maintien la présence de la zone de transition permettant de garder un accès visuel à la fenêtre B pourtant située sous la fenêtre A.
- Vue 9.** Une action sur la fenêtre C la place au-dessus du groupe de fenêtres A-B. De fait ici, le mécanisme de superposition fonctionne au niveau des groupes de fenêtres.

Prototypage fonctionnel : deuxième itération

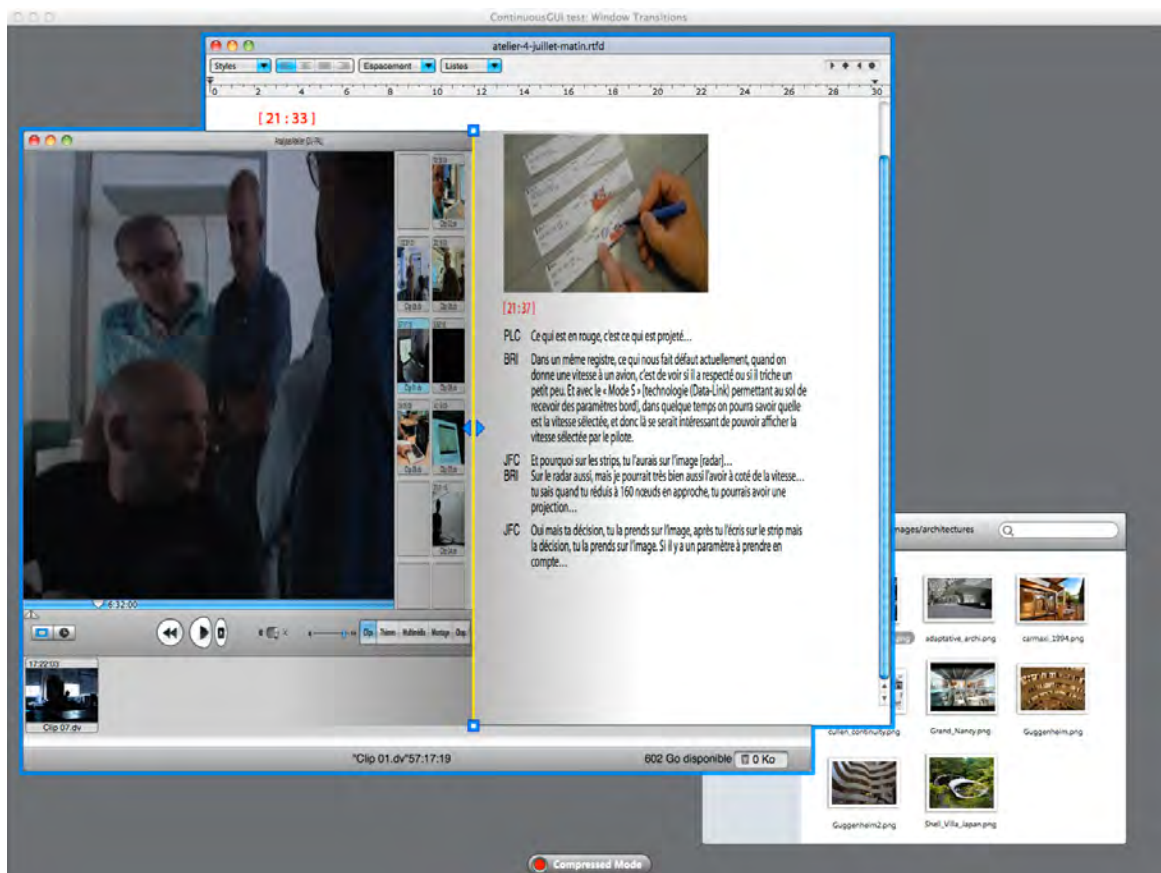


Figure 173 : Deuxième prototype fonctionnel de *Window Transition* réalisé avec djnn, et implémentant le scénario 4 de transcription d'un atelier

Le prototype fonctionnel djnn *Windows Transition* a été itéré pour reprendre le scénario de travail de transcription d'un atelier de conception. La Figure 173 présente la création d'une zone de transition entre deux fenêtres, une (pseudo) application iMovie permettant de manipuler une vidéo de l'atelier et une (pseudo) application TextEdit permettant de saisir la transcription. Un contour dynamique (trait épais bleu) visualise la fusion multi-fenêtres. Une limite dynamique (trait vertical jaune) avec deux points d'extrémité (carrés bleus) permet de modifier la portée et la distribution de la zone de fusion entre les fenêtres superposées. Une modalité activée de compression visuelle déforme les deux contenus pour permettre la visualisation intégrale des contenus superposés.

Cette deuxième itération a permis de mieux vérifier la pertinence graphique et des interactions liées à l'usage d'une zone de transition entre fenêtre : création d'un espace interactif multi-fenêtres ; fusion graphique de la zone de superposition avec visualisation partagée ou intégrale des contenus superposés ; adaptation visuelle et interactive des contenus...

Ce prototype illustre les notions de limites et passages (voir 4.2.2.2) et de forme et déformations (voir 4.2.2.3). Il illustre plusieurs apports potentiels intéressants du concept de continuité pour les GUI. Le premier concerne l'association de fenêtres applicatives permettant l'utilisation coopérative de ressources multiples et la création-enregistrement de configurations spécifiques à des activités ou projets. Le deuxième concerne le dépassement du concept de fenêtres superposables et d'opacité des processus. Ici, la création d'une zone de transition permet, à la fois, une continuité perceptuelle des contenus superposés, avec une répartition contrôlée des surfaces d'affichages entre les deux fenêtres, mais aussi la continuité d'un affichage total des deux contenus en mode compression.

Dans l'exemple précis du scénario de transcription vidéo, cette répartition-compression des affichages permet d'atteindre visuellement et d'interagir avec les widgets de contrôle de la vidéo (iMovie) et de l'enregistrement (audio et de notation) du stylo Anoto (LiveScribe).

4.6. Conclusion et perspectives

4.6.1. Rappel des objectifs

Cette troisième démarche de recherche avait pour premier objectif d'analyser les interfaces graphiques des systèmes interactifs de type ordinateur personnel au regard du concept de continuité pour identifier les besoins et la pertinence d'un tel concept pour les GUI. Il avait pour second objectif d'élaborer à partir de cette analyse les principes graphiques de ce concept de continuité pour offrir un support à la conception des interfaces graphique des systèmes interactifs complexes.

4.6.2. Travail réalisé et apports au concept de continuité

4.6.2.1. Analyse initiale

■ Identification des besoins de la continuité pour les GUI

Nous avons tout d'abord exposé les principes de l'architecture logicielle de l'interface graphique utilisateur (GUI) des systèmes interactifs de type ordinateur personnel (PC). Nous avons relevé un ensemble de questions liées aux choix graphiques de cette architecture des GUI, qui peuvent engendrer des problèmes d'utilisabilité ou des limitations d'usage potentiels pour l'utilisateur, et qui relèvent selon nous d'une problématique de continuité. Cette inspection menée à partir de documents, a été complétée par un recueil de besoins concernant les usages complexes des environnements informatiques, réalisé à partir d'interviews et d'atelier menés avec des experts informatiques et des designers. Cette étude centrée sur le contexte des GUI a été étendue au contexte cockpit par une analyse de l'évolution des interfaces avions basée sur des travaux antérieurs de recherche ou menée dans le cadre de cette thèse (cf. 2.2.1). Cette analyse initiale a abouti à l'identification de principes pour le design de la continuité dans les GUI.

■ États de l'art

Deux états de l'art structurés ont été fournis. Le premier concerne des publications de l'interaction homme machine que nous associons au principe de continuité et qui adressent plus spécifiquement les aspects graphiques. Ces travaux de recherche constituent selon nous des apports pour le concept de continuité même si la plupart d'entre eux ne s'y réfèrent pas. L'identification de ces publications et leur mise en relation avec le concept constituent l'une des contributions de notre travail. Ces apports ont été structurés en classes d'usage de la continuité : *continuités géométriques* de l'espace graphique, construction par *composition de composants*, *association* entre applications et *connexions* entre données, *continuité de navigation* spatiale et temporelle dans l'activité, *arrangement et rôle de l'espace* d'interaction, *continuités graphiques* et des représentations, *transitions et variations* visuelles, *continuité d'accès* au contenu, *continuité d'usage*.

Un second état de l'art, externe au domaine de l'IHM, a proposé des concepts théoriques et des principes intéressants pour notre problématique de design et plus largement pour la conception de l'interface graphique des systèmes

interactifs. Ces travaux, issus de la géographie et de l'architecture, nous ont permis d'identifier un ensemble de principes de design : notion de *heurts* et d'*obstacle* perceptifs ; relations entre *formes* et *espace* ; principes de *limites* et de *passages*, *limites* comme une transition entre espaces, *passages* comme ouvertures, capacités d'accès et espace-parcours de traversée ; principe de *déformation* des formes, de dépassement des *contradictions formelles* et d'adéquation au contexte, d'*adaptation organique* des systèmes de formes.

4.6.2.2. Synthèse des explorations de design

Nous avons proposé, à partir de cette analyse initiale, les premiers résultats d'une exploration orientée design du concept de continuité pour les interfaces graphiques. Nous avons tout d'abord restitué des éléments de la phase d'idéation, notamment par l'exposition de roughs d'exploration graphique qui illustrent des principes de continuité pour les espaces, structures et composants graphiques.

Nous avons enfin développé, au travers de cinq exemples, une première implémentation du concept de continuité. Ces prototypages s'appuient la réalisation de scénarios de conception ou ont bénéficié du cadre d'avancement de projets existants. Ont été adressées les problématiques : de *place d'activités* (**Acp.1,4,6**) dans le cadre d'un concept de cockpit sur surface continue ; de *plasticité des formes* (**Acp.3**) et de *continuité de représentation* dans le cadre d'une interface de supervision multi-drones ; de *continuité d'accès* perceptif et interactif (**Acp.2,3,5**) pour des outils logiciels « embarqués » ; de *continuité d'usage* entre applications (**Acp.1,3,4,6**), continuité d'accès aux ressources et continuité d'accès perceptif et interactif entre fenêtres applicatives associées. Ces deux derniers prototypages illustrent, plus particulièrement, les principes de *limites* et de *passages* entre composants graphiques de l'interface.

Nous voulons souligner l'intérêt pour l'IHM d'une approche orientée design et de techniques d'idéation graphique comme les roughs, pour explorer rapidement et de façon large un concept concernant l'interface graphique.

4.6.3. Perspectives

Ces premiers résultats sont encore exploratoires. Il nous semble nécessaire d'envisager à partir de ce point d'avancement une meilleure formalisation du concept. Ce travail de formalisation doit concerner prioritairement : les principes graphiques de limites et passages dans l'IHM ; l'identité visuelle, la continuité figuration-abstraction et la saillance graphique ; les régularités perceptives ; la composition, l'ordonnancement et la connexion graphiques ; la continuité d'accès perceptif et interactif aux contenus et aux structures ; la notion de dispositif spatial, de « places » d'activités et d'habitat interactif. La soumission d'une publication pourrait constituer une première étape.

CONCLUSION GÉNÉRALE

***Apports d'un concept de continuité pour
l'architecture graphique de l'interface utilisateur
des systèmes interactifs complexes.***



*Exposition d'estampes,
gravure de M.C. Escher, 1956*

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de thèse avait pour but d'explorer l'adéquation d'un concept de continuité pour supporter la conception de l'interface graphique utilisateur des systèmes interactifs. Il était motivé par une complexification de ces interfaces — densité croissante de l'affichage graphique et usage simultané de ressources logicielles multiples — qui engendre des problèmes potentiels de lisibilité et d'utilisabilité des systèmes.

Cette recherche a été conduite à partir de trois explorations de design, avec trois approches ou niveaux d'observation.

Une première approche, au niveau *micro* de la *forme* typographique, et par extension à destination des structures de formes et objets graphiques, nous a permis d'évaluer la puissance d'expression du concept, et de ses deux principes consubstantiels de continuité et de discontinuité. Nous avons démontré de façon expérimentale que la mise en œuvre du *principe de discontinuité* au niveau de l'élaboration des formes permet de construire l'identité visuelle des objets graphiques et de garantir leur lisibilité-discrimination au sein d'affichages complexes ou même pour des contextes d'usage dégradés. Nous avons, dans le même temps, montré que l'application du *principe de continuité* au niveau de la structure graphique qui met en œuvre le jeu de formes, fonde la relation entre ses parties ou composants, garantit la lisibilité-compréhension de l'ensemble, et favorise le confort de lecture. Nous avons exposé l'intérêt pour ce faire, d'une mise en œuvre de propriétés graphiques globales, par exemple de métriques et d'instructions de composition, embarqués dans le composant logiciel, et qui permettent d'agir sur la régularité visuelle des formes et des objets et sur la qualité de rendu et de lecture de la structure.

Une deuxième approche au niveau *macro* de l'*espace d'interaction* a mis en évidence les qualités du concept pour construire et renforcer la *cohérence* du dispositif interactif. Elle a permis de considérer la portée du concept au travers l'identification d'un ensemble de dimensions de la continuité et de la diversité de ses usages. Nous avons explicité les rôles et les potentialités du concept de continuité pour la construction d'une cohérence « systémique » du dispositif ou *habitat* interactif : continuité perceptuelle et de l'espace d'interaction, au sein même des objets augmentés, entre objets physiques et virtuels, entre représentations, entre surfaces et modalités interactives ; continuité système et de l'architecture logicielle entre composants physiques (objets tangibles, supports matériels, arrangements dans l'espace physique) et composants numériques (modèle, objets virtuels, gestionnaire d'interface, processus de calcul) ; continuité temporelle et de l'activité, offerte par les capacités du dispositif à supporter la programmation de l'action et à permettre les externalisations cognitives.

Une troisième approche au niveau *méta* s'est intéressée à l'*architecture graphique* de l'interface. Elle a identifié la rigidité des systèmes actuels, fondés sur une forte généricité (continuité) des représentations et un principe de séparation-cloisonnement (discontinuité) des processus logiciels, « fenêtres » et composants graphiques. Centrés sur l'application, les GUI de ces systèmes n'intègrent pas de mécanismes permettant de gérer globalement la concurrence ou les particularisations visuelles, les liens ou les hiérarchies entre les nombreux objets et composants graphiques affichés simultanément à l'écran, ni de mécanismes favorisant l'usage coopératif d'applications multiples. Cette architecture est peu adaptée à la complexification des interfaces et des usages. Nous avons, pour répondre à cette complexification, identifié un ensemble de besoins et proposé une revue des nombreux apports issus de l'interaction homme-machine ou externes au domaine qui intéressent et renseignent ces besoins pour les GUI. À partir de ces exigences, nous avons expérimenté dans une approche orientée design les potentialités d'un concept plus *dialogique* entre continuité et discontinuité, visant à la fois : à restituer de la discontinuité mais aussi de la conformité aux représentations ; à « ouvrir les fenêtres » à la continuité et à favoriser une *porosité* des structures à l'interaction et au contexte. Nous avons enfin proposé un ensemble de principes de design, notamment le concept de *limites et passages*, comme principes d'architecture graphique du design de la continuité dans les interfaces utilisateur. Nous avons illustré leur utilisation à travers plusieurs exemples de nouvelles techniques graphiques pour l'interaction.

En cohérence de sens avec le terme de continuité, qui définit la relation des parties à un tout *d'une seule tenue*, nous avons mené cette démarche d'exploration du concept selon les principes « *dialogique* » et « *hologrammatique* » formulés par Edgar Morin dans son introduction à la pensée complexe [Morin 1990]. Dialogique de par la nécessité d'appréhender ensemble et sans opposition le *concept couple* de continuité et de discontinuité. Hologrammatique de par la nécessité de considérer à la fois les parties et le tout dans une démarche d'approfondissement du concept de continuité à travers de trois explorations de design. De plus, ces explorations du concept ont voulu ancrer la réflexion dans le design et à partir du « faire » : « faire » de la création typographique ; « faire » de la construction tangible d'un espace hybride ; « faire » de l'exploration graphique de continuités du GUI à travers une démarche orientée design des roughs et des prototypes. Cette *praxis* du design des espaces interactifs a formé par parties notre conceptualisation théorique du concept de continuité qui, par retour, a donné sens aux designs : les parties formant la lisibilité du tout, le tout structurant la lecture en compréhension des parties.

Ce travail de recherche ne s'est pas fait sans difficultés. « Poursuivre » une telle tâche au milieu de nombreuses autres activités professionnelles, sans être suffisamment disponible et concentré ; aborder la thèse avec un sujet plus pressenti que clairement délimité, avec un certain flou méthodologique et tant d'ambition dans la largeur du thème à traiter ; compenser par la diversité des expérimentiels, l'inexpérience initiale à un tel travail académique et parfois à un manque de maîtrise de concepts et outils d'un domaine disciplinaire informatique non natif. Tout cela a été difficile. Et plus particulièrement la confrontation à l'écriture, qui si elle éclaire et permet de développer le sens et l'articulation du travail de recherche, met aussi en évidence l'ampleur de la tâche du passage à la formalisation et à l'explicitation.

Ce travail de recherche n'est pas « idéal » et sans critique. Il m'apparaît à l'instant de cette conclusion comme un compromis insatisfaisant, issu des difficultés rencontrées, notamment les contraintes temporelles et de concentration, et donc forcément encore très inachevé. Néanmoins, l'hypothèse initiale de ce travail : la pertinence et de la qualité du concept de continuité pour supporter la conception des interfaces graphiques, me paraît fortement et largement confirmée.

Les explorations menées ont contribué à élaborer, à instrumenter et à valider un nouveau concept pour l'interaction homme machine. Ces explorations et contributions ne sont néanmoins pas toutes également matures et beaucoup de travail reste à faire, notamment concernant le troisième volet pour l'architecture graphique des interfaces utilisateur. La formalisation du concept et plus particulièrement la réalisation de modèles plus formels d'explicitation et d'outillage, restent encore un travail à accomplir et des perspectives.

Ces perspectives sont de deux ordres, sur la forme et sur le fond. Sur la forme, il me paraît indispensable d'adosser ce travail à venir sur des projets réels, avec une recherche ancrée dans un terrain d'application exigeant et pour-quoi pas critique comme celui du cockpit. Cette exigence du « réel » permet la confrontation à un processus fondé sur le besoin et sur l'activité qui, même si elle limite à un usage local et particulier du concept, me semble toujours « fonder » la construction théorique. Cette démarche de recherche est encore trop « isolée » et nécessite une prise en charge plus collective dans le cadre d'un thème de recherche mené en équipe.

Sur le fond, le travail mené dans le laboratoire autour de la notion de processus avec *djnn* [Magnaudet 2014] m'apparaît comme une opportunité de confrontation de sens et de formalisation pour le concept de continuité avec des chercheurs ayant une approche très différente de ce thème. Mon approche et mes apports sur ces questions graphiques me paraissent permettre une contribution croisée et fertile des deux objectifs de recherche. D'autre part, et parallèlement à un travail de formalisation du concept de continuité, trois thèmes me semblent prioritaires pour continuer ce travail : la formalisation des principes graphiques de *limites* et *passages* ; la continuité des représentations visuelles entre *abstraction* et *figuration* ; la continuité des structures graphiques de *places d'activités*, et les passages ouverts dans et entre ces structures.

J'espère que cette thèse et des publications prochaines me permettront de poursuivre et d'amplifier le travail entamé sur ces questions, si possible au travers de collaborations de recherche.

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

- AFNOR. NF EN 894-2, (1997). Sécurité des machines – Spécifications ergonomiques pour la conception des dispositifs de signalisation et des organes de service – partie 2 : dispositifs de signalisation, avril 1997.
- Agrawala, M. and Shilman, M., (2005). DIZI: a digital ink zooming interface for document annotation. In *Proceedings of the 2005 IFIP TC13 international conference on Human-Computer Interaction (INTERACT'05)*, Maria Francesca Costabile and Fabio Paternò (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 69–79.
- Agarawala, A. and Balakrishnan, R., (2006). Keepin' it real: pushing the desktop metaphor with physics, piles and the pen. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '06)*, Rebecca Grinter, Thomas Rodden, Paul Aoki, Ed Cutrell, Robin Jeffries, and Gary Olson (Eds.). ACM, New York, NY, USA, pp. 1283–1292.
- Alexander, C., (1971). *De la synthèse de la forme*, Paris, Dunod, 1971
- Appert, C., and Beaudouin-Lafon, M., (2006). SwingStates: adding state machines to the swing toolkit. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '06)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 319–322.
- Appert, C. and Fekete, J.-D., (2006). OrthoZoom scroller: 1D multi-scale navigation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '06)*, Rebecca Grinter, Thomas Rodden, Paul Aoki, Ed Cutrell, Robin Jeffries, and Gary Olson (Eds.). ACM, New York, NY, USA, pp. 21–30.
- Appert, C., Chapuis, O. and Pietriga, E., (2012). Dwell-and-spring: undo for direct manipulation. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '12)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 1957–1966.
- Bae, S.H., Balakrishnan, R., and Singh, K., (2008). ILoveSketch: as-natural-as-possible sketching system for creating 3d curve models. In *Proceedings of the 21st annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '08)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 151–160.
- Barboni, E., Conversy, S., Navarre, D., and Palanque, P., (2006). Model-based engineering of widgets, user applications and servers compliant with ARINC 661 specification. In *Proceedings of the 13th international conference on Interactive systems: Design, specification, and verification (DSVIS'06)*, Gavin Doherty and Ann Blandford (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 25–38.
- Bauer, D. & Cavonius, C.R. (1980). Improving the legibility of visual display units through contrast reversal. In E. Grandjean and E. Vigliani (Eds.), *Ergonomic aspects of visual display terminals*. London: Taylor and Francis.

- Beaudouin-Lafon, M., and Lassen, H., (2000) The architecture and implementation of cpn2000, a post-wimp graphical application. In Proc. UIST '00, ACM Press (New York, NY, USA, 2000).
- Beaudouin-Lafon, M., (2004). Designing interaction, not interfaces. In Proc. AVI '04. ACM, New York, NY, USA, pp. 15–22.
- Beaudoux, O., (2006). DoPIDom: une approche de l'interaction et de la collaboration centrée sur les documents. In Proc. IHM '06. ACM, New York, NY, USA, pp. 19–26.
- Becker, W. and Pashler, H., (2002). Volatile visual representations: Failing to detect changes in recently processed information *Psychonomic Bulletin & Review*, Vol. 9, No. 4. (December 2002), pp. 744–750
- Bederson, B., Hollan, J., Perlin, K., Meyer, J., Bacon, D., and Furnas, G. (1996). Pad++: A zoomable graphical sketchpad for exploring alternate interface physics. *J. Visual Lang. Comput.* 7, 1, 3–31.
- Bederson, B., (2000). Fisheye menus. In *Proceedings of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST)*. ACM Press, pp. 217–225.
- Beldie, I.P., Pastoor, S. & Schwarz, E. (1983). Fixed versus variable letter width for televised text. *Human Factors*, 25, pp. 273–277.
- Bellenkes, A. H., Wickens, C.D. & Kramer, A.F. (1997). Visual scanning and pilot expertise: The role of attentional flexibility and mental model development. *Aviation Space and Environmental Medicine*, 68, pp. 569–579.
- Benhacène, R., (2005), As Rapid as Paper Strips? Evaluation of VertiDigi, a new control tool for Terminal Sectors, Baltimore, USA, ATM2005
- Benkirane, R., (2013). *La complexité, vertiges et promesses*, Edition Le Pommier, collection poche, Paris 2013.
- Bezerianos, A., Dragicevic, P. and Balakrishnan, R., (2006). Mnemonic rendering: an image-based approach for exposing hidden changes in dynamic displays. In *Proceedings of the 19th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '06)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 159–168.
- Bertin J., (1967). *Sémiologie graphique*, Paris, Mouton/Gauthier-Villars, 1967
- Bertin J., (1975). *La Graphique et le traitement graphique de l'information*, Paris, Flammarion, 1975.
- Bi, X. and Balakrishnan, R., (2009). Comparing usage of a large high-resolution display to single or dual desktop displays for daily work. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 1005–1014.
- Bier, E. A., Stone, M. C., Pier, K., Buxton, W., and Deroose, T. D. (1993). Toolglass and magic lenses: The see-through interface. In *Proceedings of the International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. ACM SIGGRAPH, ACM Press, pp. 73–80.
- Bimber, O. and Raskar, R., (2005). *Spatial Augmented Reality: Merging Real and Virtual Worlds*. A K Peters Ltd, Wellesley, Massachusetts. 2005

- Boff, K.R. & Lincoln, J.E., (1988). *Engineering Data Compendium: Human Perception & Performance*, Harry G. Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.
- Bouma, H. (1980). Visual reading processes and the quality of text displays. *Ergonomic Aspects of Visual Display Terminals*, E. Grandjean & E. Vigliani (Eds), Taylor & Francis, London, pp. 101–114.
- Bucher, P. and Chatty, S., (2009). Qu'est-ce qu'une surface d'affichage?: une analyse rétrospective. In *Proceedings of the 21st International Conference on Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM '09)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 3–12.
- Cail, F. (1993). Présentation de l'information sur écran de visualisation. *Cahiers de notes documentaires n°151*, 2^e trimestre 1993.
- Card, S.K; Moran, T. P; and Newell, A., (1986). The Model Human Processor: An Engineering Model of Human Performance. In K. R. Boff, L. Kaufman, & J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance*. Vol. 2: Cognitive Processes and Performance, 1986, pp. 1–35.
- Cardosi, K.M. & Murphy, E.D. (Eds) (1995). *Human factors in the design and evaluation of Air Traffic Control systems*. U.S. Department of Transportation, Research and Special Programs Administration, John A. Volpe National Transportation Systems Administration, Cambridge, MA.
- Carr, T.H., Posner, M.I., Pollatsek. A. & Snyder, C.R. (1979). Orthography and familiarity effects in word processing. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108(4), pp. 389–414.
- CENA/R01-003 - Mertz, C., Vinot, J. L. and Etienne, D. (2001). Guide de conception de Digistris. Rapport technique. CENA, 2001.
- Chandler, P. A., (2004). The crucial role of cognitive processes in the design of dynamic visualisations, *Learning and Instruction*, 14(3), 353–357.
- Chapuis, O., and Roussel, N., (2005). Metisse is not a 3D desktop!. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '05)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 13–22.
- Chevalier F., Dragicevic P., Bezerianos A., Fekete J-D., (2010). Using Text Animated Transitions to Support Navigation in Document Histories. In *Proceedings of the 28th Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '10)*, Atlanta, USA, April 10 - 15, 2010. ACM, New York, NY, pp. 683–692
- Ching, F. *Architecture: Form, Space, and Order*. Van Nostrand Reinhold, New York 1975, 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., Hoboken, 2007.
- Cingolani, F., Di Siena, D., Fernandez, M., Gonzalez, P., Reyes Najera, C. and Baraona Pohl, E., (2010). Urban aperture(s) >< Porosity as a new model for hybrid public space, *Urban Hybridization*, 2010
- Clauer, C.K., (1977). CRT display legibility with reduced character size. Rep. HFC-25, IBM Human Factors Center, General Products Division, San Jose, Calif.

- CNRTL, portail numérique de ressources linguistique informatisées et d'outils de traitement de la langue (créé par le CNRS) : <http://www.cnrtl.fr>
- Cockburn, A., Karlson, A. and Bederson, B. B., (2009). A review of overview+detail, zooming, and focus+context interfaces. *ACM Comput. Surv.* 41, 1, Article 2 (January 2009), 31 pages.
- Conversy, S., Roussel, N., Hansen, H., Evans, H., Beaudouin-Lafon, M., Mackay, W., (2003). Sharing daily-life images with videoProbe. In *Proceedings of the 15th French-Speaking Conference IHM 2003*.
- Conversy, S., Gaspard-Boulinc, H., Chatty, S., Valès, S., Dupré, C. and Ollagnon, C., (2011). Supporting air traffic control collaboration with a TableTop system. In *Proceedings of the ACM 2011 conference on Computer supported cooperative work (CSCW '11)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 425–434.
- Conversy, S., Chatty, S. and Hurter, C., (2011). Visual scanning as a reference framework for interactive representation design. *Information Visualization* 10, 3 (July 2011), pp. 196–211.
- Conversy, S., Chatty S., Gaspard-Boulinc, H. and Vinot, J.-L., (2014) L'accident du vol AF447 Rio-Paris: un cas d'étude pour la recherche en IHM. Article soumis à IHM 2014: *Proceedings of the 26ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine* (long article at IHM). ACM Press, 2014.
- Coutaz, J., Nigay, L., (2001), *Architecture logicielle conceptuelle des systèmes interactifs*. Chapitre 7 du livre *Analyse et Conception de l'Interaction Homme-Machine*, Hermes Éditeur, 2001, pp. 207–246
- Curbow, D., and Dykstra-Erickson, E., (1997). Designing the opendoc human interface. In *Proc. DIS '97*, ACM Press (New York, NY, USA, 1997), pp. 83–95.
- Cullen, G., (1961). *The concise townscape*, London, Architectural Press.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Editions Odile Jacob.
- Dillon, A. (1992). Reading from paper versus screens: a critical review of the empirical literature. *Ergonomics*, 35(10), pp. 1297–1326.
- Di Siena, D., (2009) “Espaces públicos híbridos como catalizadores de ciudadanía”, thèse de doctorat, 2009
- DiVerdi, S., Nurmi, D. and Höllerer, T., (2003). ARWin-A Desktop Augmented Reality Window Manager. In *Proceedings of the 2nd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR '03)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, page 298
- Dourish, P. (2006). Re-space-ing place: "place" and "space" ten years on. In *Proc. CSCW '06*, ACM Press (New York, NY, USA, 2006), pp. 299–308.
- Dragicevic P., Chatty S., Thevenin D. and Vinot J-L. (2005). Artistic Resizing: A Technique for Rich Scale-Sensitive Vector Graphics. *Proceedings of the 18th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '05)*, Seattle, WA, USA, October 23 - 26, 2005. ACM Press, New York, NY, pp 201–210.

- Dragicevic P., Ramos G., Bibliowicz J., Nowrouzezahrai D., Balakrishnan R., Singh K. (2008). Video Browsing by Direct Manipulation. Proceedings of the 26th Annual SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08), Florence, Italy, April 05 - 10, 2008. ACM, New York, NY, pp. 237–246.
- Dragicevic, P., and Shi, Y., (2009). Visualizing and manipulating automatic document orientation methods using vector fields. In Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS '09). ACM, New York, NY, USA, pp. 65–68.
- Dragicevic P., Huot S. and Chevalier F. (2011). Glimpse: Animating from Markup Code to Rendered Documents and Vice Versa. In Proceedings of the 24th ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '11). ACM, New York, NY, USA, pp. 257–262.
- Duchnicky, R.L. & Kolars, P.A., (1983). Readability of text scrolled on visual display terminals as a function of window size. *Human Factors*, 25, pp. 683-692.
- Duncanson, J.P., (1994). Visual and auditory symbols : A literature review. DOT/FAA/CT-TN94/37, Federal Aviation Administration, Technical Center, Atlantic City.
- Dyson, M.C., (2004). How physical text layout affect reading from screen. *Behaviour & Information Technology*, nov.-dec. 2004, vol. 23, n° 6, Taylor & Francis Ltd, pp. 377–393
- Elmqvist, N., Assarsson, U. and Tsigas, P., (2007). Employing dynamic transparency for 3D occlusion management: design issues and evaluation. In Proceedings of the 11th IFIP TC 13 international conference on Human-computer interaction (INTERACT'07), Cécilia Baranauskas, Philippe Palanque, Julio Abascal, and Simone Diniz Junqueira Barbosa (Eds.). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 532–545.
- Elmqvist, N., Henry, N., Riche, Y. and Fekete, J.-D., (2008). Melange: space folding for multi-focus interaction. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '08). ACM, New York, NY, USA, pp. 1333–1342.
- d'Estrée Sterk, T., (2009). Shape Control in Responsive Architectural Structures - Current Reasons & Challenges, The School of The Art Institute of Chicago. January 2009
- Eyl, M., (1995). The Harmony Information Landscape: Interactive, Three Dimensional Navigation Through an Information Space. Master's thesis, Graz University of Technology, Austria.
- Fessy, G., Nouvel, J., et Tonka, H., (1995). Institut du monde arabe : Une architecture de Jean Nouvel, Gilbert Lezénés, Pierre Soria, Architecture studio, 3ème éd., Paris, Demi-cercle, coll. « Un lieu / un architecte », 1995
- Fisher, D.F., (1975). Reading and visual search. *Memory & Cognition*, 3, pp. 188-196.
- Fishkin, K.P., (2004). A Taxonomy for and Analysis of Tangible Interfaces. *Personal and Ubiquitous Computing*.

- Fitchett, S., Cockburn, A. and Gutwin, C., (2013). Improving navigation-based file retrieval. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 2329–2338.
- Fitzmaurice, G., Ishii, H., Buxton, W. (1995). Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proc. of CHI'95*.
- Frank, T. and Johnston, O., (1997). *The Illusion of Life: Disney Animation*. Hyperion. pp. 47–69.
- Frutiger, A., (1999). *L'Homme et ses signes*. Atelier Perrousseaux Editeur.
- Gaffiot, F., (1934). *Dictionnaire latin-français*. Edition Hachette, Paris 1934. édition en ligne : <http://www.lexilogos.com/latin/gaffiot.php>
- Gauthier, Y., Marcy, J., Duprat, D., Paoleschi, A., Letondal, C., Lesbordes, R., Vinot, J.L. and Hurter, C., (2014). Interactions gestuelles pour Strip'TIC, un environnement tangible pour les contrôleurs aériens. In *Proceedings of 26ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM'14*. ACM Press, 2014.
- Geymayer, T., Steinberger, M., Lex, A., Streit, M. and Schmalstieg, D., (2014). Show me the invisible: visualizing hidden content. In *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems (CHI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 3705–3714.
- Gibson, J.J., (1977). The theory of affordances. In R. Shaw and J. Bransford, editors, *Perceiving, Acting, and Knowing: Toward an Ecological Psychology*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1977.
- Gibson, J.J., (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin, Boston. 1979.
- Gill, J. M., Silver, J., Sharville, C., Slater, J. and Martin, M., (1998). Design of a typeface for digital television. In: I. Placencia-Porrero & E. Ballabio eds. *Improving the quality of life for the European citizen: technology for inclusive design and equality*, Third Tide Congress, Helsinki, 248-252. Amsterdam: IOS Press.
- Gombrich, E.H, (2001). *Histoire de l'Art*, Phaidon Press Limited, 7ème édition française, paris, mai 2001.
- Gould, J.D. & Grischkowsky, N. (1986). Does visual angle of a line of characters affect reading speed ? *Human Factors*, 28, pp. 165–173.
- Green, M. and Jacob R. J. K., (1991). Software Architectures and Metaphors for Non-WIMP User Interfaces. *Computer Graphics*, ~0125, no. 3, pp. 229–235, July 1991.
- Gutwin, C. (2002). Improving focus targeting in interactive fisheye views. In *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*. ACM Press, pp. 267–274.
- Haralambous, Y. (2007). *Fonts & Encodings*. Published by O'Reilly Media Inc, 2007
- Harper, R.H.R. and Hughes, J. A., (1991). 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 EPC-1991-125.

- Harrison, S. and Dourish, P., (1996). Re-Place-ing Space: The Roles of Space and Place in Collaborative Systems. *Proc. ACM Conf. Computer-Supported Cooperative Work CSCW'96* (Boston, MA), 67-76. New York: ACM.
- Hedge, A., (2003). Ergonomics considerations of LCD versus CRT displays. http://ergo.human.cornell.edu/Pub/LCD_vs_CRT_AH.pdf
- Hockney, G.R.J., (1970). Changes in attention allocation in a multicomponent task under loss of sleep. *British Journal of Psychology*, 61, 473-480.
- Hollan, J., Hutchins, E. and Kirsh, D., (2000). Distributed cognition: toward a new foundation for human-computer interaction research. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 7, 2 (June 2000), 174-196.
- Holding, D.H., (1983). *Fatigue. Stress & Fatigue in Human Performance*, G.R.J. Hockney, (Ed), Chichester, Wiley: England, 145-167.
- Holick, A. J., Chrysler S. T., Park, E. S. and Carlson P. J., (2006). Evaluation of the Clearview Font for negative contrast traffic signs. Technical report of Texas Dep. of Transportation. <http://tti.tamu.edu/documents/0-4984-1.pdf>
- Hornecker, E. and Buur, J., (2006). Getting a grip on tangible interaction: a framework on physical space and social interaction. In *Proc of CHI '06*. ACM.
- Humphreys, G.W. and Bruce, V., (1989). *Visual Cognition: Computational, experimental and neuropsychological perspectives*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, USA.
- Hurter, C., Conversy, S., Vinot, J. L. and Jestin, Y., (2009). Représentations écologiques de données temporelles: exemples et apports. In *Proceedings of the 21st International Conference on Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM '09)*. ACM, New York, NY, USA, 33-42.
- Hurter, C., Tissoires, B. and Conversy, S., (2009). FromDaDy: Spreading Aircraft Trajectories Across Views to Support Iterative Queries. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 15, 6 (November 2009), 1017-1024.
- Hurter, C., Telea, A. and Ersoy, O., (2011). MoleView: An Attribute and Structure-Based Semantic Lens for Large Element-Based Plots. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17, 12 (December 2011), 2600-2609.
- Hurter, C., Ersoy, O. and Telea, A., (2012). Graph Bundling by Kernel Density Estimation. (*EuroVis 2012*). *Computer Graphics Forum* 31, 3pt1 (june 2012) p865-874.
- Hurter, C., Lesbordes, R., Letondal, C., Vinot, J.L. and Conversy, S. (2012). StripTIC: exploring augmented paper strips for air traffic controllers. In *Proc. of AVI '12*, ACM.
- Hurter, C., Taylor, R., Carpendale, S. and Telea, A., (2014). Color Tunneling: Interactive Exploration and Selection in Volumetric Datasets. In *Proceedings of the 2014 IEEE Pacific Visualization Symposium (PACIFICVIS '14)*. IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 225-232.

- Ishak, E.W. and Feiner, S.K., (2004). Interacting with hidden content using content-aware free-space transparency. In Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '04). ACM, New York, NY, USA, 189-192.
- Itten, J., (1961). The Art of Color: the Subjective Experience and Objective Rationale of Color, Originally published in German as *Kunst der Farbe*: Studienausgabe by Johannes Itten, Otto Maier Verlag, Ravensburg, 1961
- Jackson, A. (directed by) (2004). CoRe Project - Baseline Exemplary Style Guide, Eurocontrol EATM Guidelines - HRS/HSP-006-GUI-01.
- Jacobs, A.M., Nazir, T.A. & Heller, D., (1989). Perception of lower letters in peripheral vision: A discrimination matrix based on saccade latencies. *Perception & Psychophysics* 46(1): 95-102, 1989.
- Jones, B. R., Benko, H., Ofek, E. and Wilson A. D., (2013). IllumiRoom: peripheral projected illusions for interactive experiences. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13). ACM, New York, NY, USA, 869-878.
- Kandogan, E., and Shneiderman, B. (1996). Elastic windows: improved spatial layout and rapid multiple window operations. In Proc. AVI '96, ACM Press (New York, NY, USA, 1996), 29–38.
- Katifori, A., Halatsis, C., Lepouras, G., Vassilakis, C. and Giannopoulou, E. (2007). Ontology visualization methods—a survey. *ACM Comput. Surv.* 39, 4, Article 10 (November 2007).
- Kirsh, D., (1995). The intelligent use of space. *Artificial Intelligence*. 73, 1-2 (February 1995), 31-68.
- Koffka, K., (1935). *Principles of Gestalt Psychology*, Londres, Routledge & Kegan Paul. 1935.
- Kolers, P. A., Duchnick, R.L. & Ferguson, D.C., (1981). Eye movement measurement of readability of CRT displays. *Human Factors*, 23, 517-527.
- Kramer, A., (1994). Translucent patches—dissolving windows. In Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '94). ACM, New York, NY, USA, pp. 121-130.
- Kurtenbach, W., Sternheim, C.E. & Spillmann, L., (1984). Change in hue of spectral colors by dilution with white light (Abney effect). *Journal of the Optical Society, A*, 1, pp. 365-372.
- Laar, D.V. & Flavell, R., (1988). Towards the construction of a maximally-contrasting set of colors. *People & Computers IV*, D.M. Jones & R. Winder (Eds), Cambridge University Press, Cambridge.
- Larson, K., (2004). The science of word recognition. Advanced Reading Technology, Microsoft Corporation. <http://www.microsoft.com/typography/ctfonts/WordRecognition.aspx>
- Lecolinet, E., (2003). A molecular architecture for creating advanced GUIs. In Proceedings of the 16th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '03). ACM, New York, NY, USA, pp. 135-144.

- Le Corbusier (Jeanneret-Gris, C. E.), (1955). *Le Modulor II*, édition de l'Architecture d'aujourd'hui, collection Ascoral, Boulogne-sur-Seine, 1955
- Lee, J. C., Forlizzi, J. and Hudson S. E., (2002). The kinetic typography engine: an extensible system for animating expressive text. In *Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '02)*. ACM, New York, NY, USA, 81-90.
- Lee, J., Jun, S., Forlizzi, J. and Hudson, S. E., (2006). Using kinetic typography to convey emotion in text-based interpersonal communication. In *Proceedings of the 6th conference on Designing Interactive systems (DIS '06)*. ACM, New York, NY, USA, 41-49.
- Lee, J. Olwal, A. Ishii, H. and Boulanger, C., (2013). SpaceTop: integrating 2D and spatial 3D interactions in a see-through desktop environment. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. ACM, New York, NY, USA, 189-192.
- Letondal, C., (2012). Strip'TIC: Exploring Augmented Paper Strips for Air Traffic Controllers, Task FITG, novembre 2012, Lille.
- Letondal, C., Castet, J., Vinot, J.L, de la Rivière, J.B and Pauchet, S. (2014). Exploring the Physical Design Space for Situation Awareness and Performance in the Interactive Cockpit. TEI 2014 WIP paper (poster).
- Leroux, M. (1993) The role of expert systems in future cooperative tools for air traffic controllers. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Aviation Psychology*. (pp. 26-29). Columbus, OH.
- Levy-Schoen, A., (1967). Les mouvements oculaires d'exploration. *Journal L'année psychologique*, vol. 67 (2), 1967, pp. 569-599.
- Littre, E., (1878). *Dictionnaire de la langue française*. édition en ligne : <http://www.littre.org>
- Lynch, K., (1969), *L'image de la cité*, Dunod, Paris, 1969.
- Lyons, P. and Moretti, G., (2004). Nine tools for generating Harmonious Colour Shemes. In *Proceedings of APCHI 2004*, Rotorua.
- Lyons, P. and Moretti, G., (2005). Incorporating Groups into a Mathematical Model of Color Harmony for Generating Color Schemes for Computer Interfaces. In *Proceedings of the 2005 IEEE conference on Virtual Environments, HCI, and Measurement Systems*, 18--20 July 2005, pp. 80-85.
- Mackay, W. E., Fayard, A-L., Frobert, L. and Médini L., (1998). Reinventing the familiar: exploring an augmented reality design space for air traffic control. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '98)*, Clare-Marie Karat, Arnold Lund, Joëlle Coutaz, and John Karat (Eds.). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 558-565.
- MacKay, W. E., (1999). Is paper safer? The role of paper flight strips in air traffic control. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 6, 4 (December 1999), 311-340.

- Mackinlay, J., Robertson, G., and Card, S., (1991). Perspective wall: Detail and Context Smoothly Integrated. In Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI), pp. 173–179.
- McCann J. and Pollard, N., (2009). Local layering. ACM Trans. Graph. 28, 3, Article 84 (July 2009), 7 pages.
- Magnaudet, M. and Chatty, S., (2014). What Should Adaptivity Mean to Interactive Software Programmers? In Proceedings of EICS 2014, Rome, Italy, ACM.
- Majaj, N.J., Pelli, D.G., Kurshan, P. & Palomares, M., (2002). The role of spatial frequency channels in letter identification. *Vision Research* 42, pp. 1165–1184, 2002.
- Maury, S., Athènes, S. and Chatty, S. (1999). Rhythmic menus: toward interaction based on rhythm. In CHI '99 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '99). ACM, New York, NY, USA, pp. 254–255.
- McCann, J. and Pollard, N., (2009). Local layering. In ACM SIGGRAPH 2009 papers (SIGGRAPH '09), Hugues Hoppe (Ed.). ACM, New York, NY, USA, Article 84 , 7 pages.
- McClelland, J.L. and O'Regan, J.K., (1981). Expectations increase the benefit derived from parafoveal visual information in reading words aloud. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 7(3), pp. 634–644.
- McConkie, G.W. and Rayner, K., (1975). The span of the effective stimulus during a fixation in reading. *Perception & Psychophysics* 17: pp. 578–586. 1975.
- McGuffin, M., and Balakrishnan. R., (2002). Acquisition of expanding targets. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '02). ACM, New York, NY, USA, pp. 57–64.
- Menozzi, M., Näpflin, U. & Krueger, H. (1999). CRT versus LCD: A pilot study on visual performance and suitability of two display technologies for use in office work. *Displays*, 20, pp. 3–10.
- Merlin, B., Benhacène, R. and Kapp, V., (2007). Interface multi-layer et processus d'évolution des systèmes interactifs en activité critique. In Proceedings of the 19th International Conference of the Association Francophone d'Interaction Homme-Machine (IHM '07). ACM, New York, NY, USA, pp. 191–198.
- Merlin, B., Hurter, C., and Benhacene R., (2008). A solution to interface evolution issues: the multi-layer interface. In CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '08). ACM, New York, NY, USA, pp. 2715–2720.
- Mertz, C. and Vinot, J.L., (1998). Conception par maquettage rapide: application à des écrans tactiles pour le contrôle aérien. Dans actes du 6ème colloque Ergonomie et Informatique Avancée, Interaction Homme-Machine (Ergo-IHM 2000), Biarritz, France, octobre 2002, CRT ILS & ESTIA ed., pp.145–152.

- Mertz, C., and Vinot, J.L. (1999). Touch input screens and animations: more efficient and humanized computer interaction for ATC(O) In proceedings of the 10th International Symposium on Aviation Psychology, Columbus, OH, USA may 1999.
- Mertz, C. and Vinot, J.L., (1999). Interface gestuelle pour écran tactile, animations et design graphique : un guide de conception, dans onzième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine (IHM'99), Montpellier, France, novembre 99, Cépaduès ed., isbn 2-85428-513-1, vol. I, pp.1–8.
- Mertz, C., Chatty, S. and Vinot, J.L. (2000). The influence of design techniques on user interfaces: the DigiStrips experiment for air traffic control dans International Conference on Human-Computer Interaction in Aeronautics (HCI-Aero 2000), Toulouse, France, pp. 27–29 September 2000.
- Mertz, C., Chatty, S. and Vinot, J.L. (2000). Pushing the limits of ATC user interface design to avoid S&M interaction: the DigiStrips Experience. Dans (ATM2000).
- Mertz, C., Vinot, J.L., and Etienne, D., (2002). Entre interaction directe et reconnaissance d'écriture: les gestes écologiques. Dans Ergonomie et informatique Avancée, Interaction Homme-Machine (Ergo-IHM 2002), Biarritz, France, octobre 2002, CRT ILS & ESTIA ed., isbn 2-9514772-0-1 pp.145–152.
- Mills, C. & Weldon, L., (1987). Reading text from computer screens. ACM Computing Surveys, 19(4), pp. 329–358.
- Monk, A.F. & Hulme, C., (1983). Errors in proofreading: Evidence for the use of word shape in word recognition. Memory & Cognition, 11, 16-23.
- Morin, E., (1990). Introduction À La Pensée Complexe. Collection Communication et Complexité. ESF, 1990.
- Morris, M. & Hinrichs, R., (1996). Web Page Design. California: Sun Microsystems Inc.
- Munzner, T., (1998). Exploring large graphs in 3D hyperbolic space. IEEE Comput. Graph. Appl. Vol. 18, No. 4, pp. 18–23.
- Muter, P., (1996). Interface design and optimization of reading of continuous text. Cognitive aspects of electronic text processing, H. Van Oostendorp & S. De Mul (Eds), Norwood, N.J.: Ablex.
- Muter, P., Latremouille, S.A., Treurniet, W.C. & Beam, P., (1982). Extended reading of continuous text on television screens. Human Factors, 24, pp. 501–508.
- Myers. B. A., (1988). A Taxonomy of Window Manager User Interfaces. IEEE Comput. Graph. Appl. 8, 5 (September 1988), pp. 65–84.
- Nan, L., Sharf, A., Xie, K., Wong, T.T., Deussen, O., Cohen-Or, D. and Chen, B., (2011). Conjoining Gestalt rules for abstraction of architectural drawings. In Proceedings of the 2011 SIGGRAPH Asia Conference (SA '11). ACM, New York, NY, USA, , Article 185
- Nazir, T.A., Jacobs, A.M. & O'Regan, J.K. (1998). Letter legibility and visual word recognition. Memory & Cognition, 26 (4), pp. 810–821.

- Nazir, T.A., Ben-Boutayab, N., Decoppet, N., Deutsch, A. & Frost R. (2004). Reading habits, perceptual learning, and recognition of printed words. *Brain & Language* 88, pp. 294–311.
- Nazir, T.A., Heller, D. & Sussmann, C., (1992). Letter visibility and word recognition: The optimal viewing position in printed words. *Perception & Psychophysics* 52(3), pp. 315–328, 1992.
- Neal, A.S., (1968). Legibility requirements for educational television. *Information Display*, 5, 39-44.
- NEXGEN Implementation Plan 2013, (2013). US Departement of Transportation, FAA, Juin 2013, <http://www.faa.gov/nextgen/implementation/media/>
- Norman, D. A. (1999). Affordance, conventions, and design. *Interactions* 6, 3 (May 1999), 38-43.
- Norman, D. A. (2008). THE WAY I SEE IT: Signifiers, not affordances. *Interactions* 15, 6 (November 2008), pp. 18–19.
- North, C., and Schneiderman, B., (1997). A taxonomy of multiple window coordinations. Tech. rep., University of Maryland at College Park, 1997.
- North, C. and Shneiderman, B., (2000), Snap-together visualization: a user interface for coordinating visualization via relationnel schema , In *Proc. AVI'00*. ACM, New York, NY, USA, pp. 128–13
- Noy, N. F., Fegerson, R. W. and Musen, M. A., (2000). The knowledge model of Protege-2000: Combining interoperability and flexibility. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management (EKAW'2000)*, Juan-les-Pins, France.
- Olsen, D.R., Taufer, T. and Fails, J.A., (2004). ScreenCrayons: annotating anything. In *Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '04)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 165–174.
- O'Regan, J.K., (1983). Elementary perceptual and eye movement control processes in reading. In K. Rayner (Ed.), *Eye movements in reading: Perceptual and language processes*. New York: Academic Press, pp. 121–139.
- Paulson, E.J. & Goodman, K.S., (1999). Influential studies in eye-movement research. www.readingonline.org/research/eyemove.html.
- Pelli, D.G., Farell, B. & Moore, D.C., (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature* 423, pp. 752–756, 2003.
- Pietriga, E., (2002). IsaViz: a Visual Environment for Browsing and Authoring RDF Models, WWW 2002, the 11th World Wide Web Conference (Developer's day), Honolulu, Hawaii, USA, 7-11 May 2002
- Pietriga, E., (2005). A toolkit for addressing HCI issues in visual language environments. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL-HCC)*, pp. 145–152.

- Radl, G.W., (1980). Experimental Investigations for optimal presentation-mode and colours of symbols on the CRT-screen. Aspects of Visual Display Terminals, E. Grandjean & E. Vigliani (Eds), Taylor & Francis, London, pp. 127–136.
- Raynal, M., Vinot, J.L, Truillet, P., (2007). Fisheye Keyboard: Whole Keyboard Displayed on Small Device. Dans ACM Symposium on User Interface Software and Technology - poster session (UIST 2007), Newport, USA, ACM Press, pp. 65–66.
- Reenskaug, T., (1979). Models - Views - Controllers. Technical note, Xerox PARC, Dec. 1979. <http://heim.ifi.uio.no/~trygver/mvc/index.html>
- Reicher, G.M., (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81, pp. 274–280, 1969.
- Reichle, E.D., (2006). Computational models of eye-movement control during reading: Theories of the “mind-eye” link. *Cognitive Systems Research* 7, 2–3.
- Rivadeneira, W. and Bederson, B. B., (2003). A Study of Search Result Clustering Interfaces: Comparing Textual and Zoomable Interfaces, University of Maryland HCIL Tech. Rep. HCIL-2003-36, Oct. 2003.
- Rosenholtz, R., Nagy, A.L. and Bell, N.R., (2004): The effect of background color on asymmetries in color search, *Journal of Vision*, 4, pp. 224–240.
- Rubinstein, R., (1988). Digital Typography: An Introduction to Type and Composition for Computer System Design. Addison-Wesley Publishing Compagny, Nov 1988. ISBN 0-201-17633-5
- Rudnicki, A.I. & Kolers, P.A., (1984). Size and case of type as stimuli in reading. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 10, pp. 231–249.
- Sanders, M.S. & McCormick, E.J., (1987). Human Factors in Engineering and Design, McGraw-Hill.
- Schlienger C., Dragicevic P., Ollagnon C., Chatty C., (2006). Les transitions visuelles différenciées: principes et applications. In Proceedings of the 18th French speaking conference on Human-Computer Interaction (IHM '06), Montréal, Canada, April 18 - 21, 2006. ACM Press, New York, NY, pp. 59–66.
- Schnädelbach, H., (2010). Adaptive Architecture - A Conceptual Framework, in proceedings of MediaCity 2010, Weimar, Germany, 2010
- Serres, M., (2007). Les nouvelles technologies : révolution culturelle et cognitive. Conférence INRIA, Lille 10-11 déc. 2007. http://www.ac-grenoble.fr/ien.bourgoinashnord/IMG/pdf_Texte_de_la_conference.pdf
- Shneiderman, B., (1992). Tree visualization with tree-maps. A 2-d space-filling approach. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 11, No. 1, September 1992, pp. 92–99.
- Séré, B., Marendaz, C. and Hérault, J., (2000). Nonhomogeneous resolution of images of natural scenes. *Perception*, vol. 29 (12), 2000, 1403–1412.
- SESAR The ATM Target Concept, rapport D3 issued by the SESAR Consortium for the SESAR Definition Phase Project co-funded by the European Commission and EUROCONTROL, 2007.

- Sparrow, L. & Mielliet, S., (2002). Activation of phonological codes during reading: Evidence from eye movements. *Brain & Language*, 81, pp. 509–516.
- Smith, R. B. and Taivalsaari, A., (1999). Generalized and stationary scrolling. In *Proceedings of the 12th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '99)*. ACM, New York, NY, USA, 1–9.
- Snyder, H.L. & Maddox, M.E. (1978). Information transfer from computer-generated dot-matrix displays. Final Rep. HFL-78-3, NTIS N°AD A063 505. Virginia Polytechnic Institute & State University, Blacksburg, Va.
- Snyder, H.L., Decker, H.H., Lloyd, C.J.C. & Due, C. (1990). Effect of Image Polarity on VDT Task Performance. *Proceedings of the Human Factors Society 34th Annual Meeting*, 1447-1451.
- Stokes, A., Wickens, C. & Kite, K. (1990). *Display Technology : Human Factors Concepts*. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA
- Stuerzlinger, W., Chapuis, O., Phillips, D., Roussel, N., (2006). User interface façades: towards fully adaptable user interfaces. In *Proc. UIST'06*, ACM, NY, USA, pp. 309–318.
- Sun, L. and Guimbretière, F., (2005). Flipper: a new method of digital document navigation. In *CHI '05 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '05)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 2001–2004.
- Tabart, G., Athènes, S., Conversy, S. & Vinot, J-L. (2007). Effets des Paramètres Graphiques sur la Perception Visuelle : Expérimentations sur la forme, la surface, l'orientation des objets et la définition des écrans. *IHM 2007: Proceedings of the 19^{ème} Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. ACM Press.
- Tabart, G., Conversy, S., Vinot, J-L., & Athènes, S. (2008). Designing graphical elements for cognitively demanding activities: an account on fine-tuning for colors”. *Proceedings of the 15th conference on Design Specification and Verification of Interactive Systems (DSVIS 2008)*, Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag.
- Tabard, A., Mackay, W., Roussel, N. and Letondal, C., (2007). PageLinker: integrating contextual bookmarks within a browser. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '07)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 337–346.
- Tabard, A., (2009). Supporting Lightweight Reflexion on Familiar Information. *Mémoire de thèse*, Paris Octobre 2009.
- Tashman, C., and Edwards, W. K., (2012). Windowscape: Lessons learned from a task-centric window manager. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 19, 1 (May 2012), 8:1–8:33.
- Terry, M., Mynatt, E.D., Nakakoji, K. and Yamamoto, Y., (2004). Variation in element and action: supporting simultaneous development of alternative solutions. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 711–718.

- Tinker, M.A. (1963). *Legibility of Print*. The Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- Ullmer, B. and Ishii, H., (2000). Emerging frameworks for tangible user interfaces. *IBM Syst. J.* 39, 3-4 July 2000.
- Van Nes, F.L. (1986). Space, colour and typography on visual display terminals. *Behaviour & Information Technology*, 5, pp. 99–118.
- Vartabedian, A.G. (1971). The effects of letter size, case, and generation method on CRT display search time. *Human Factors*, 13, pp. 363–368.
- Varzi, A. C., (2007). Spatial Reasoning and Ontology: Parts, Wholes, and Locations. *Handbook of Spatial Logics*, Berlin: Springer-Verlag, 2007, pp. 945–1038
- Walraven, J. (1985). The colours are not on the display: a survey of non-veridical perceptions that may turn up on a colour display. *Displays: Concepts and Applications*, January, pp. 35–42.
- Verdana Font : www.microsoft.com/typography/web/fonts/verdana/
- Vetting Wolf, T., Rode, J. A., Sussman, J. and Kellogg, W. A., (2006). Dispelling “design” as the black art of CHI. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ‘06)*, Rebecca Grinter, Thomas Rodden, Paul Aoki, Ed Cutrell, Robin Jeffries, and Gary Olson (Eds.). ACM, New York, NY, USA, pp. 521–530.
- Vinot, J.L, (2007) Lisibilité des informations textuelles sur l’image radar ODS-MAGE STD, Note interne DSNA/DTI/R&D, novembre 2007
- Vinot, J.L. Sylvie Athenes, S., (2012). Legible, are you sure?: an experimentation-based typographical design in safety-critical context. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI ‘12)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 2287–2296.
- Vinot, J.L., Letondal, C., Lesbordes, R., Chatty, S., Conversy, S. and Hurter, C., (2014). Tangible Augmented Reality for Air Traffic Control, *ACM Interactions journal*, July-August 2014, vol 22, jul. 2014 ACM, New York, NY, USA.
- Waldner, M., Puff, W., Lex, A., Streit, M. and Schmalstieg, D., (2010). Visual links across applications. In *Proceedings of Graphics Interface 2010 (GI ‘10)*. Canadian Information Processing Society, Toronto, Ont., Canada, Canada, pp. 129–136.
- Waldner, M., Grasset, R., Steinberger, M. and Schmalstieg, D., (2011). Display-adaptive window management for irregular surfaces. In *Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS ‘11)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 222–231.
- Ware, C., (2008). *Visual Thinking: For Design*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA.
- Wilkins, A.J. & Nimmo-Smith, I. (1987). The clarity and comfort of printed text. *Ergonomics*, 30, pp. 1705–1720.

- Wickens, C. D. and Hollands, J. G., (1999). *Engineering Psychology and Human Performance*. 3rd ed., Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- Winnemoller, H., (2011). Xdog: advanced image stylization with extended difference-of-gaussians. In *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering, NPAR '11*, ACM (New York, NY, USA, 2011), pp. 147–156
- Wong, J. and Hong, J., (2008). What Do We « Mashup » When We Make Mashups, In *Proc. WEUSE'08*, ACM, New York, NY, USA, pp. 35–39
- Yarbus, A.L. (1967). *Eye movements and vision*. New York: Plenum.
- Younes, C., (2006). Limites, passages et transformations en jeu dans l'architecture. *Revista de Urbabismo*, 15 (2006), pp. 453–469.
- Youngman, M. & Scharff, L. (1998). Text width and margin width influences on reading of GUIs. *Presentation at SWPA 1998*.
- Zhang, J. and Norman, D. A. (1994) Representations in Distributed Cognitive Tasks, *Cognitive Science* 18, pp. 87–122, 1994

GLOSAIRE AÉRONAUTIQUE

AFM	Aircraft Flight Manual
CDS	Control and Display System
CIDS	Cabin Intercommunication Data System
ECAM	Electronic Centralized Aircraft Monitoring
EFIS	Electronic Flight Instrument System
EWD	Engine and Warning Display
FAP	Flight Attendant Panel
FCOM	Flight Crew Operating System
FCTM	Flight Crew Training Manual
FMS	Flight Management System
FMT	Flight Management Terminal
FOA	Flight Ops Application
FOCT	Flight Operations Consultation Tool
IFPA	In-Flight Performance Application
LDPA	Landing Performance Application
MDU	Multifunction Display Unit
MEL	Minimum Equipment List
MFD	Multi Functional Display
ND	Navigation Display
OIS	Onboard Information System
OIT	Onboard Information Terminal
OMS	Onboard Maintenance System
OMT	Onboard Maintenance Terminal
PFD	Primary Flight Display
PMAT	Portable Maintenance (Multipurpose) Access Terminal
SD	System Display
TOPA	Take-Off Performance Application
WBA	Weight and Balance Application

GLOSAIRE TYPOGRAPHIQUE

Aliasing ou crénelage

En typographie numérique, l'*aliasing*, ou *crénelage* (effet d'escalier), correspond à l'effet visuel produit par le rendu d'un dessin vectoriel du caractère sur l'espace matriciel, bitmap, de l'écran. Le rendu écran du texte est toujours bitmap et chaque pixel ne peut adresser qu'une couleur unique. En mode de rendu bitmap aliasé, le moteur graphique peut seulement "choisir" d'affecter ce pixel au dessin de détail (premier plan) et donc à la couleur du caractère, ou de conserver la couleur de fond. L'effet d'aliasing est renforcé par les technologies d'écran type LCD dont le rendu du pixel ne produit pas de diffusion lumineuse.

Alignement ou justification

Positionnement du texte par rapport aux marges du paragraphe ou de la page. Il existe quatre types d'alignement principaux : (fer) à gauche, (fer) à droite, justifié ou centré. Pour un alignement à gauche ou à droite (et donc ferré sur un seul côté), on parle également de composition en drapeau.

Anatomie de la lettre, parties ou primitives typographiques.

Le dessin de la lettre est constitué d'éléments de construction, ou parties de la lettre, correspondant en calligraphie à des gestes simples de tracé (vertical, horizontal, diagonal, en boucle...), et en typographie à des formes régulières du tracé appelées aussi primitives typographiques : fût, montant ou hampe, traverse ou barre, oblique, branche ou diagonale, panse, contre-poinçon ou rond-deur, descendante ou jambage inférieur, ascendante ou jambage supérieur, queue, boucle, pointe, crochet, empattement, attaque, ...

Anti-aliasing, anticrénelage ou lissage de caractère

L'*anti-aliasing*, ou *anticrénelage*, est une méthode de lissage graphique de rendu des caractères permettant d'éviter l'aliasing ou crénelage lors de l'affichage d'un texte ou d'images numériques pour des basses résolutions. Les techniques d'anti-aliasing sont réalisées au niveau du pixel: sommation de couleur du pixel entre couleur de détail et couleur de fond proportionnelle à leur surface respective, ou au niveau du sous-pixel, par exemple ClearType de Microsoft, qui agit sur la couleur de chacune des composantes r, g et b du pixel.

Aplomb

L'*aplomb* est un invariant typographique qui correspond à l'inclinaison du caractère. Il peut avoir comme valeurs de paramétrage « roman » (droit) ou italique. L'italisation d'une fonte et donc du dessin des caractères ne peut se faire que vers la droite, avec un angle standard de 12 à 15°.

Approche

Espacement moyen des caractères d'un bloc de texte, ou espacement entre deux caractères successifs (en anglais kerning). Parfois employé comme synonyme d'interlettrage.

Ascent

Partie supérieure de la lettre, à partir de la *ligne de pied* jusqu'au haut du caractère. L'*ascent* correspond à la mesure partant de la ligne de base jusqu'au point le plus haut atteint par les glyphes, les accents ou marques diacritiques exclus. La propriété correspondante est définie dans les métriques de la fonte.

Bas-de-casse ou lettre minuscule

Les lettres *bas-de-casse* sont les lettres minuscules (*LATIN SMALL LETTER* d'Unicode), par extension du nom de la partie inférieure de la boîte (casse) où elles sont classées par le typographe.

Cadratin

Unité de mesure standard en typographie de longueur des espaces (en anglais *em*). Il désigne la force de corps de la police courante ; par exemple, en corps 12, le cadratin vaut 12 points. Dans la pratique le *cadratin* correspond environ à la largeur du caractère capitale M ou à deux largeurs de O. Les espaces insécables entre caractères, par exemple pour précéder un « : », « ; » ou « ? », sont exprimés en cadratin (deux-tiers de cadratin, tiers de cadratin, quart de cadratin, cinquième de cadratin, sixième de cadratin).

Capitale ou lettre majuscule

Les lettres *capitales* sont les lettres majuscules (*LATIN CAPITAL LETTER d'Unicode*). Les petites capitales désignent en typographie, des caractères capitales ayant la même graisse que les caractères minuscules mais dont la hauteur correspond à la hauteur x-height du corps de ces minuscules (hauteur du caractère « x »)

Caractère

Description simple, à prépondérance linguistique ou logique d'une classe d'équivalence de glyphes, par exemple la « Lettre capitale latine A » qui peut être représentée par des glyphes très différents d'une fonte à l'autre, par exemple « A » ou « A ». Un *caractère* appartient souvent à une famille de dessins coordonnés correspondant aux variations de style, par exemple « A », « A » ou « A ». Les caractères individuels portent le nom de leur famille d'appartenance et sont également désignés par leur dénomination (italique, gras ou étroit, par exemple).

Le terme *caractère* revêt un sens différent suivant le contexte. En référence aux systèmes d'exploitation informatiques modernes, il désigne généralement un code auquel est associée une signification particulière. Ainsi, le code de caractère décimal 65 symbolise la lettre capitale « A ». La plupart des systèmes d'exploitation représentent les codes de caractères par une unité de données sur 8 bits (octet). Unicode utilise un mécanisme de sérialisation codé sur 21 bits (à l'intérieur de nombres 32 bits).

Casse

La *casse* est un invariant typographique qui correspond à une classe de fonction des lettres alphabétiques : capitale, minuscule ou petite capitale. Le terme casse vient des tiroirs ou casiers (la casse) dans lesquels étaient rangés les caractères en plomb. Les caractères minuscules, les plus fréquemment utilisés, étaient rangés en bas, à portée de main, donc en « bas de casse ». Les capitales étaient rangées dans la partie haute du tiroir, en « haut de casse ».

Centré

Texte composé (justifié) de manière à ce que chaque ligne soit centrée sur la médiane verticale au bloc de texte, et donc situé à équidistance des marges gauche et droite. Pour des raisons de lisibilité, l'utilisation de ce type de composition doit être réservée à des textes courts, par exemple les titres, car le saut oculaire au début de la ligne suivante est plus difficile à opérer que pour un texte aligné à gauche.

Chasse

La chasse peut être définie comme la distance séparant l'origine d'un glyphe du glyphe suivant ou pour le moteur de rendu typographique comme le vecteur d'avancement au caractère suivant. La *chasse* désigne également un invariant typographique qui correspond à la largeur relative des caractères, pour une chasse *normale* la largeur du caractère « H » équivaut à environ 80% de sa hauteur capitale. Cet invariant permet de définir des variantes possibles de fonte pour une famille typographique par exemple *étroite* (condensed) ou *large* (extended) ou paramètre de transformation horizontale d'un caractère.

Condensée (ou condensed)

Variante de chasse d'une police de caractères plus étroite que d'ordinaire (dont le ratio largeur/ hauteur est plus faible), permettant de composer davantage de glyphes sur une largeur de texte donné.

Contraste

Pour une police particulière, le *contraste* évoque la variation des épaisseurs de traits formant les caractères. Les *linéales* modernes comme l'*Helvetica* sont des polices peu contrastées, l'épaisseur des différentes parties de leur tracé est très régulière, au contraire de polices *garaldes* ou *réales* comme le Didot, qui présentent des « pleins » et des « déliés » contrastés.

Contreforme ou contrepoinçon

En typographie, la *contreforme*, *contrepoinçon* ou *rondeur* désigne l'espace intérieur blanc de certaines lettres. Cet espace intérieur correspond généralement à un espace fermé, mais par extension, la contreforme désigne aussi les espaces ouverts. Plus généralement on parlera de contreforme par opposition à la forme.

Corps

Mesure standard du caractère, exprimée en points, et délimitée par l'extrémité supérieure de la plus haute ascendante et l'extrémité inférieure de la plus basse descendante. En Europe, le caractère se mesure souvent par la hauteur des capitales en millimètres.

Descent

Partie inférieure de la lettre, à partir de la *ligne de pied* jusqu'au bas du caractère. Le descent correspond à la mesure partant de la ligne de base jusqu'au point le plus bas atteint par les glyphes, les accents ou marques diacritiques exclus. La propriété correspondante est définie dans les métriques de la fonte.

Dessin de lettre

Style de caractère. C'est le cas du style italique de la famille de caractères Garamond, par exemple.

Diagonale (branche ou oblique)

La Diagonale, branche ou oblique, désigne une primitive de la lettre correspondant à un tracé oblique comme les deux diagonales symétriques du « A » ou les branches à droite du « K ».

Empattement (ou Serif)

L'*empattement* désigne les formes terminales du tracé produites par l'outil calligraphique sur le support. Par exemple l'incise correspond à de petits tracés triangulaires présents aux extrémités des écritures lapidaires (gravées dans la pierre). Une fonte est dite à empattement ou « *serif* » si elle présente des empattements et sans empattement ou « *sans* » (ex. Lucida-Sans) en leur absence.

Espace

Mot féminin désignant l'intervalle entre deux lettres ou deux mots. — Mot masculin désignant le caractère « espace ». — Mot masculin désignant l'espacement entre lignes ou en composition une surface blanche entre une zone de texte et une illustration par exemple.

Espacement proportionnel et non-proportionnel

Les polices peuvent être à espacement *proportionnel*, chaque caractère possède une largeur (width) différente permettant son dessin (exemple le « m » est plus large que le « i »), ou *non proportionnel* (*monospace*), chaque caractère possède la même largeur de caractère. Ce mode monospace génère une forte hétérogénéité de l'espacement visuel entre caractères et pose des problèmes de lisibilité.

Famille de fontes

Également appelée *famille*. Ensemble de fontes élaborées à partir d'une même création typographique en vue de leur utilisation conjointe pour la composition de texte. Par exemple, la famille de fontes Garamond se compose de variations des styles : aplomb (romain et italique), graisses (normal, demi-gras et gras), chasse (condensed, normal, extended) etc. Chacun des assortiments de style, par exemple **gras-italique** ou light-condensed nécessite la réalisation d'une fonte spécifique.

Fonte

La *fonte* correspondait à un jeu de caractères en plomb d'une typographie de même corps (taille typographique) et partageant les mêmes propriétés : aplomb, graisse et chasse. Pour la typographie numérique, une fonte est une variation d'une famille typographique qui rassemble un jeu de caractères partageant ces mêmes propriétés mais permettant de générer tous les corps.

Fût (hampe ou montant)

Le *fût*, la *hampe* ou le *montant* désigne une primitive de la lettre correspondant à un tracé vertical comme le « I ». Les fûts sont constitutifs de nombreuses lettres (17 capitales et 17 minuscules).

Glyphe

Le *glyphe* est l'image d'un signe typographique, ou la trace finale imprimée ou affichée d'un caractère. Le terme de glyphe revêt un sens différent suivant le contexte. En micro-informatique, et plus précisément en référence aux systèmes d'exploitation modernes, ce terme désigne souvent une forme de rendu à l'écran ou sur un support papier d'une fonte symbolisant un code de caractère. Les glyphes les plus usités (typographie latine) correspondent aux formes de rendu des caractères alphanumériques, accentués ou de ponctuation, mais les symboles et les formes de caractères iconiques telle que ITC Zapf Dingbats constituent également des glyphes. La version 4.1 d'Unicode (2005) rassemble environ 245 000 positions de codes assignées.

Goutte

La *goutte* désigne une primitive de dessin des lettres correspondant à une amorce ou extrémité de forme circulaire formée « en goutte » comme la l'extrémité de la lettre minuscule « r ».

Graisse

Invariant typographique correspondant à l'épaisseur relative de tracé d'une fonte. Cet attribut de style peut prendre des valeurs comme maigre, normal, demi-gras, gras, extra-gras (noir), etc. (ou extra-light, light, regular, semibold, bold, extra-bold, black...)

Gras (ou bold)

Variante de graisse d'une police. La fonte « Bold » est une version plus « noire » d'un caractère dont les traits ont été épaissis pour les faire mieux ressortir sur la page. Certaines fontes « Extra-Bold » ou « Black » sont caractérisées par une graisse encore plus importante. Une fonte « Regular » correspond à une graisse « Normale » et une fonte « Semi-Bold » à une variante de graisse intermédiaire.

Hauteur de capitale

La Hauteur de capitale d'une police est un métrique de la fonte qui désigne la hauteur comprise entre la ligne de base et l'extrémité supérieure des caractères capitales. Elle peut être égale ou non à celle de l'ascendante. La hauteur de capitale sert, dans certains systèmes, à mesurer le corps de la police.

Hinting ou algorithmes d'optimisation

Instructions mathématiques intégrées aux polices numériques pour garantir une meilleure adaptation du dessin à la grille de rendu pixels quelles que soient

la force de corps et la résolution du périphérique d'affichage. Les instructions de *hinting* réalisées par exemple pour la fonte Verdana de Microsoft sont particulièrement adaptées pour les rendus à faible résolution et garantissent à la fois une meilleure lisibilité des caractères affichés sur écran et une plus grande régularité de la composition du texte favorisant le confort de lecture.

Italique (Oblique)

Paramètre d'invariant typographique d'*Aplomb* du caractère, correspondant à une version inclinée de la fonte typographique. Les lettres « droites » sont appelées caractères romains ou roman.

Interlettrage

Ajustement de l'espace entre les lettres d'un bloc de texte afin de faire tenir plus ou moins de texte ou d'en améliorer la lisibilité. Contrairement au crénage qui affine les approches des lettres deux à deux, l'interlettrage s'applique à un bloc de texte entier. On désigne parfois l'interlettrage sous les termes d'approche ou de crénage libre.

Interlignage

Espace ajouté entre les lignes d'un texte pour le rendre lisible. Ce terme désignait à l'origine les lames fondues en alliage dont se servaient les imprimeurs pour espacer physiquement les lignes de caractères de plomb. La plupart des applications appliquent automatiquement un interlignage standard en fonction du corps de la police. Si un interlignage étroit permet de remplir davantage la page, le texte, lui, devient moins lisible. À l'inverse, un interlignage large espace le texte sur la page et le rend plus lisible. Lorsque l'interlignage est négatif, le rapprochement des lignes crée un accollement ou une superposition.

Intermots

Espace variable entre les mots dont l'ajustement vise à améliorer la lisibilité du texte ou à faire tenir un bloc typographique dans un espace donné.

Invariants typographiques

Les *invariants typographiques* correspondent aux propriétés de style : aplomb, graisse, chasse, espacement, empattement, casse.

Jambage

Le *jambage* désigne une partie de la lettre minuscule dépassant l'alignement du x-height en bas (jambage bas) ou en haut (jambage haut) correspondant à un tracé vertical ou oblique comme pour le « b », le « p » ou le « j ». Il désigne aussi l'appui oblique des capitales comme le tracé en bas à droite du « R ».

Kerning (ou crénage)

Modification spécifique de l'espace entre certains caractères afin d'obtenir une régularité optique entre les lettres, nommé aussi approche. En l'absence de crénage, nombre de combinaisons de lettres induisent des variations d'espacement entre caractères du mot et sont inesthétiques. L'objectif consiste à harmoniser l'interlettrage pour garantir la lisibilité du texte.

Léger (ou light)

Valeur de graisse caractérisant une fonte d'épaisseur de tracé très fine. Certaines fontes sont caractérisées comme « Ultra Light ».

Ligne de base

La *ligne de base* est l'alignement principal, en bas des capitales, sur lequel s'appuie le dessin des lettres.

Panse (ou rondeur)

La *panse* ou *rondeur* est une primitive de dessin de la lettre correspondant à un tracé en courbe comme les deux panses de la lettre capitale « B » ou celle du « C ».

Point

Unité de mesure typographique équivalant à un soixante-douzième de pouce (0,351 mm). Un *pica* est égal à 12 points.

Pointe

La *pointe* est une primitive du dessin de la lettre correspondant à une forme en pointe formée par la rencontre de deux diagonales comme pour la lettre capitale "A"

Police de caractères

Assortiment d'une graisse, d'une chasse et d'un style déterminés de caractère. Avant l'apparition des caractères d'imprimerie à taille variable, la distinction entre la fonte, le caractère et la famille était subtile. Les termes fonte et caractère tendent à être employés l'un pour l'autre, même si le second se révèle plus exact.

Queue

La *queue* est une primitive de dessin de la lettre correspondant à l'extrémité de la lettre capitale "R" ou au trait oblique coupant la rondeur du "Q"

Romain (ou roman)

Désigne traditionnellement la variante "droite" de l'invariant typographique d'aplomb d'un caractère ou d'une fonte, par opposition à sa version italique

Sans serif ou sans empattements

Caractéristique d'une police sans empattement (sans-serif). Son dessin est généralement peu contrasté. Les caractères sans empattements donnent un aspect clair et dépouillé aux documents.

Serif ou Empattement

Petit trait transversal décoratif situé à la tête et au pied de chaque jambage d'une lettre. Issus de la capitale romaine et surtout de l'écriture calligraphique (liaisons entre dessins de lettres du tracé manuel), les empattements sont destinés à augmenter la lisibilité du caractère et à faciliter la lecture du texte.

Signe typographique

Le signe typographique désigne un symbole ou signe quelconque (lettre, lettre accentuée, chiffre, symbole, signe mathématique, accent, ponctuation, flèche, forme...) contenu dans une typographie et composant le jeu de caractères.

Style

Ensemble d'attributs visuels, comme l'aplomb, la chasse, l'empattement, l'espacement, mais aussi la famille typographique (linéale, galalée, humaniste...) avec lesquels sont spécifiés ou dessinés les caractères d'une fonte ou d'une police de caractères.

Traverse (ou barre)

La *traverse* est une primitive de dessin de la lettre correspondant à un tracé horizontal comme les trois traverses horizontales de la lettre capitale "E"

X-height (ou œil)

Il s'agit traditionnellement de la hauteur de la lettre minuscule x. L'œil désigne également la hauteur des lettres bas-de-casse d'une police de caractères, sans les hampes ascendantes et descendantes. La hauteur d'œil peut varier considérablement d'une police de caractères à l'autre, pour un corps donné.

TITLE : *Contributions of the Concept of Continuity to design graphical architecture for complex interactive systems.*

ABSTRACT

The evolution of user interfaces for interactive systems, be they critical like cockpits or mainstream like personal computers, is characterized by a continuous increase of the amount of available information. Those systems support multiple activities that require the simultaneous use of numerous data and several screens, views, applications or resources. This increase of complexity raises problems to users in terms of visual perception (density, concurrency, segmentation of information) and usability (divide, interrupt, permutation of tasks).

The notion of *Continuity* refers to a subject's ability to "link" objects, actions or events that exhibit a proximity or similarity in space or time. This ability answers to a need of simplification and structuration of the human visual perception of the available information. The perception and identification of objects are made possible thanks to the occurrence of breaks and visual saliencies or *discontinuities*. *Continuity* and *discontinuities* form the consubstantial principles of an efficient and structured reading of forms and spaces, which enabled subjects to build a consistent and continuous mental image of the world and the situation.

We think that the concept of continuity is a tool that is particularly well suited to answer to the evolution of interactive systems. We explore what brings this concept to HCI through three computer science projects. First, using an approach based on experimentations, we demonstrate the significance of the continuity and discontinuity principles for the design of a typographical font adapted to critical contexts [CHI2012]. One of the outcomes of this research is the delivery to the Airbus company of 8 digital fonts for the interfaces of cockpit. With the Strip'TIC project, we emphasized the dimensions and properties of continuity for the design of a tangible interactive space for air traffic controllers. We demonstrate the scope of the concept, which enables us to reflect on the coherence of interactive systems between the physical and digital word [CHI2013]. Finally, using a design research approach, we devised two graphical principles, the *limits* and *passages* of continuity, to architecture the graphical user interface of complex interactive systems. We illustrate their use through several examples new interactive graphical techniques.

KEYWORDS : Continuity, Graphical User Interface, GUI, Graphical Design, Legibility, Visual Perception

AUTEUR : Jean-Luc VINOT

TITRE : *Apports du concept de continuité pour l'architecture graphique de l'interface utilisateur des systèmes interactifs complexes.*

DIRECTEUR DE THESE : Stéphane CONVERSY

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Toulouse, le 17 novembre 2014

RESUMÉ

L'évolution des interfaces utilisateur des systèmes interactifs, systèmes critiques comme ceux du cockpit ou grand-public comme les ordinateurs personnels, est caractérisé par une augmentation continue du nombre d'informations accessibles. Ces systèmes supportent des activités multiples dont la réalisation exige l'utilisation simultanée de nombreuses données et de plusieurs écrans, vues, applications, ou ressources. Cette complexification des interfaces pose des problèmes aux utilisateurs en termes de capacité perceptive (densité, concurrence, segmentation, de l'information), et d'utilisabilité (fractionnement, interruption, permutation, des tâches).

La *continuité* réfère à notre capacité à « mettre du lien » entre des objets, actions ou événements présentant une proximité ou similarité dans l'espace ou dans le temps. Cette capacité répond à un besoin de simplification et de structuration de la perception visuelle humaine, des informations disponibles. La perception et l'identification de ces objets d'information sont rendues possibles par la présence de ruptures et de saillances visuelles ou *discontinuités*. *Continuité* et *discontinuité* forment ainsi les principes consubstantiels d'une lecture performante et structurée des formes et des espaces, qui permet de construire une image mentale cohérente et continue du monde et de la situation.

Nous pensons que le *concept de continuité* est un outil particulièrement adapté pour répondre à cette évolution des systèmes interactifs. Nous explorons les apports de ce concept pour l'interaction homme machine au travers de trois projets de recherche. Avec une approche basée sur l'expérimentation, nous démontrons la pertinence des principes de continuité et de discontinuité pour le design de jeux de formes typographiques adaptées aux contextes d'usage critiques. L'un des résultats de cette recherche est la livraison à la société Airbus de huit fontes de caractères numériques pour la conception des futurs interfaces du cockpit. Avec le projet Strip'TIC, nous mettons en évidence les dimensions et propriétés de la continuité pour la conception d'un espace interactif tangible pour les contrôleurs aériens. Nous montrons la portée du concept pour penser la cohérence des systèmes interactifs entre mondes physique et numérique. Enfin dans une démarche de recherche orientée design, nous élaborons les principes graphiques de *limites* et de *passages* d'un concept de continuité pour architecturer l'interface graphique utilisateur des systèmes interactifs complexes. Nous illustrons leur utilisation à travers plusieurs exemples de nouvelles techniques graphiques pour l'interaction.

MOTS-CLES

Continuité, Interface graphique utilisateur, GUI, Design graphique, Lisibilité, Perception visuelle

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : *Image, Information, Hypermédia*

INTITULE ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE : *Laboratoire d'Informatique Interactive de l'ENAC. 7 av. E. Belin, 31055 Toulouse*