



HAL
open science

Fuzzy4U : un système d'adaptation des Interfaces Homme-Machine en logique floue pour l'accessibilité

Tanguy Giuffrida

► **To cite this version:**

Tanguy Giuffrida. Fuzzy4U : un système d'adaptation des Interfaces Homme-Machine en logique floue pour l'accessibilité. Interface homme-machine [cs.HC]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2020. Français. NNT : 2020GRALM063 . tel-03173323

HAL Id: tel-03173323

<https://theses.hal.science/tel-03173323>

Submitted on 18 Mar 2021

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

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Informatique**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Tanguy GIUFFRIDA

Thèse dirigée par **Sophie DUPUY-CHESSA**, Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes,
Co-dirigée par **Maud DAMPÉRAT**, Professeure des Universités, Université Jean Monnet,
Co-encadrée par **Éric CÉRET**, Maître de Conférence, Université Grenoble Alpes

préparée au sein du **Laboratoire d'Informatique de Grenoble**
dans **l'École Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique**

Fuzzy4U : un système d'adaptation des IHM en logique floue pour l'accessibilité

Thèse soutenue publiquement le **08/12/2020**,
devant le jury composé de :

Mme Christine VERDIER

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, Présidente de jury

M. Christophe KOLSKI

Professeur des Universités, Université Polytechnique Hauts-de-France, Rapporteur

M. Marco WINCKLER

Professeur des Universités, Université de Nice-Sophia Antipolis, Rapporteur

M. Xavier LE PALLEC

Maître de Conférence, Université de Lille, Examineur

M. Jean-Philippe POLI

Ingénieur-chercheur, CEA LIST, Examineur

Mme Sophie DUPUY-CHESSA

Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, Directrice de thèse

Mme Maud DAMPÉRAT

Professeure des Universités, Université Jean Monnet, Co-directrice de thèse

M. Éric CÉRET

Maître de Conférence, Université Grenoble Alpes, Co-encadrant de thèse



Remerciements

Je souhaite remercier, en premier lieu et tout particulièrement, mes encadrants, Sophie, Éric et Maud, pour leur aide précieuse, leur présence, ainsi que pour leur patience à toute épreuve.

Je remercie l'équipe IIBM, avec une pensée particulière pour Sybille qui m'a été d'une grande aide pour l'analyse de mes données, ainsi que pour les doctorants de l'équipe IIBM qui m'ont permis de me changer les idées grâce à nos discussions, blagues, ou jeux.

Je remercie aussi ma famille pour leur soutien indéfectible durant cette thèse.

Enfin, je remercie la SFR Innovacs pour le financement de mes trois premières années de doctorat.

Table des matières

Introduction	11
1 Contexte	11
2 Problématique et question de recherche	12
3 Objectifs.....	13
4 Structure de la thèse	14
I. Accessibilité	19
1 Handicap.....	19
1.1 Définition du handicap par l’OMS	19
1.2 Définitions du handicap en IHM.....	21
2 L’accessibilité et ses barrières	22
2.1 Définition du World Wide Web Consortium	22
2.2 Différence entre accessibilité et utilisabilité	29
2.3 Recommandations d’accessibilité du web	31
2.3.1 WCAG 2.0 (2008) / WCAG 2.1 (2018).....	31
2.3.2 Exigences d’accessibilité pour les personnes malvoyantes (EAPM - 2016).....	33
2.3.3 WAI-AGE (2010).....	34
3 Exemple fil rouge.....	36
3.1 Le contexte d’usage.....	36
3.2 Les barrières à l’accessibilité	36
3.3 Les règles d’adaptation pour le dépassement des barrières à l’accessibilité	37
4 Synthèse du chapitre.....	38
II. Etat de l’Art	43
1 Travaux centrés sur l’accessibilité	44
1.1 Accessibilité pour des sites web adaptables	45
1.2 Accessibilité pour des sites web adaptatifs.....	48
2 Approches d’adaptation des IHM.....	49
2.1 Cadre de référence Cameleon et travaux associés	50
2.1.1 Cadre de référence Caméléon.....	50
2.1.2 Travaux significatifs basés sur Caméléon	51
2.1.3 Expression des règles dans les travaux issus de Caméléon.....	56
2.2 Approches d’adaptation basées sur les modèles.....	59
2.3 Autres approches d’adaptation.....	62
3 Approches d’adaptation des IHM basées sur la logique floue.....	65
4 Analyse	70
5 Synthèse du chapitre.....	72

III. Le système Fuzzy4U : concepts, architecture et implémentation	77
1 Introduction à la logique floue	77
1.1 La logique booléenne	77
1.2 La logique floue	78
1.3 Les concepts de sous-ensemble flou et de variable linguistique	78
1.4 Utilisation de règles floues pour modéliser les connaissances	80
1.5 Inférence floue	81
2 Le système Fuzzy4U : architecture logicielle et implémentation.....	83
2.1 L'architecture logicielle de Fuzzy4U	83
2.2 Implémentation du système Fuzzy4U	91
2.2.1 Composants existants.....	91
2.2.2 Moteur d'adaptation en logique floue.....	92
3 Accessibilité : règles et prototype	98
3.1 Règles pour l'accessibilité.....	98
3.1.1 Taille de police.....	99
3.1.2 Niveau de contraste et gestion de couleurs.....	100
3.1.3 Espacements entre lettres, mots, lignes et paragraphes	102
3.2 Prototype de réservation de chambres d'hôtel	103
3.3 Discussion	105
4 Synthèse du chapitre.....	106
IV. Comparaison entre logique booléenne et logique floue pour l'adaptation des IHM	111
1 Utilisation de la logique floue pour l'adaptation des interfaces.....	111
1.1 Incertitude	111
1.2 Complexité.....	113
1.3 Combinaison des règles.....	115
2 Comparaison théorique.....	116
2.1 Méthode	117
2.2 Les règles comparées	118
2.2.1 Mode d'affichage.....	118
2.2.2 Niveau de verbosité.....	119
2.2.3 Niveau de guidage	119
2.2.4 Correction des clics.....	120
2.2.5 Taille de la police	120
2.3 Résultats	121
3 Comparaison basée sur des avis d'experts	123
3.1 Protocole expérimental.....	123

3.2	Réponses des experts et méthode d'analyse	125
3.3	Résultats globaux	127
3.4	Analyse des résultats par groupes de règles	128
3.4.1	Groupe de règles G1 : DisplayMode.....	128
3.4.2	Groupe de règles G2 : Verboseité	129
3.4.3	Groupe de règles G3 : Niveau de guidage	129
3.4.4	Groupe de règles G4 : Correction des clics.....	130
3.4.5	Groupe de règles G5 : Taille de police.....	130
3.5	Discussion ouverte avec les experts.....	131
3.6	Synthèse	131
4	Discussions	132
4.1	Portée de l'étude et de l'expertise	133
4.2	Pertinence des règles	133
5	Synthèse du chapitre.....	133
Conclusion		135
1	Contributions.....	135
2	Discussion	137
2.1	Fonctions d'appartenance et méthodes de fuzzification et de défuzzification	137
2.2	Types de variables utilisées	138
2.3	Transcription de règles d'accessibilité.....	139
3	Perspectives.....	140
Références		143
Annexes		155
Annexe 1 : Liste des recommandations du WAI-AGE.....		155
Principe « Perceptible ».....		155
Principe « Utilisable ».....		158
Principe « Compréhensible »		158
Principe « Robuste ».....		159
Annexe 2 : Liste des règles d'adaptation implémentées dans Fuzzy4U.....		160
Catégorie Utilisateur		160
Catégorie Plateforme		162
Catégorie Environnement		162
Résumé.....		164
Abstract		164

Table des figures

Figure 1 : Modèle de fonctionnement utilisé par la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé.....	20
Figure 2 : Un <i>Head Wand</i> , ayant pour but d'aider une personne en situation de handicap physique à utiliser un clavier	25
Figure 3 : Un site web manquant d'accessibilité pour des utilisateurs ayant une faible précision des mains	26
Figure 4 : Un site web manquant d'accessibilité sur des petits écrans.....	28
Figure 5 : Exemple d'adaptation, selon [Richards et al. 2004], avec la mise en place d'un « navigateur large ».....	45
Figure 6 : L'architecture de l'environnement proposé par [Ghiani et al. 2017].....	48
Figure 7 : Cameleon Reference Framework.....	51
Figure 8 : L'outil de transformation de MARIA, avec un exemple de correspondance entre les différents éléments d'une IHM abstraite et une IHM concrète.....	52
Figure 9 : Les composants de l'architecture Cedar gérés par « Role-Based User Interface Simplification ».....	54
Figure 10 : Architecture du « Adaptation Integration System »	55
Figure 11 : Exemple de règle de [Limboung et al. 2004] permettant la création de composants individuels abstraits dérivés de tâches finales.	56
Figure 12 : Un extrait de mises en correspondance de modèles utilisées dans [Aquino et al. 2009] ..	59
Figure 13 : Architecture dirigée par les modèles pour des IHM adaptatives, par Yigitbas et al.	62
Figure 14 : Génération et adaptation d'IHM via MyUI.....	64
Figure 15 : Variables linguistiques utilisées dans [Cueva-Fernandez et al. 2016].....	69
Figure 16 : Architecture de Vitruvius [Cueva-Fernandez et al. 2016]	69
Figure 17 : Exemple de sous-ensemble flou défini avec une courbe triangulaire	79
Figure 18 : Exemple de variable linguistique (Acuité visuelle)	80
Figure 19 : Vue d'ensemble de l'inférence de Mamdani.....	81
Figure 20 : Résultat de l'implication.....	82
Figure 21 : Application de l'agrégation maximum à deux sous-ensembles flous	82
Figure 22 : Architecture de Fuzzy4U	83
Figure 23 : Page de localisation de l'hôtel (non adaptée - variant PC).....	85
Figure 24 : Page de localisation de l'hôtel (non adaptée - variant smartphone).....	86
Figure 25 : Augmentation de la zone de clic des interacteurs	87
Figure 26 : La méta-IHM de Fuzzy4U – Onglet Caractéristiques.....	89
Figure 27 : La méta-IHM de Fuzzy4U – Onglet Interface.....	89
Figure 28 : Un exemple de cycle d'adaptation.....	90
Figure 29 : Page de localisation de l'hôtel, adaptée à Bernard, avec un variant smartphone, et pour un environnement sombre (a) et un environnement lumineux (b).....	91
Figure 30 : ExpressIF - Création de variable	92
Figure 31 : ExpressIF – Exemple de variable définie sur un domaine discret	94
Figure 32 : ExpressIF - Les différents types de courbe possibles	94
Figure 33 : ExpressIF - Listing des règles floues créées	96
Figure 34 : ExpressIF - Mode interactif.....	96
Figure 35 : Page d'accueil de l'hôtel (non adaptée – variant PC).....	104
Figure 36 : Définition de la variable linguistique visualAcuity.....	112
Figure 37 : Définition des variables linguistiques visualAcuity et fontSize	113

Figure 38 : Règles floues définies pour l'adaptation de la taille de police en fonction de l'acuité visuelle.....	113
Figure 39 : Schéma explicatif de la méthode de défuzzification des barycentres pondérés pour une valeur d'entrée de 0	114
Figure 40 : Schéma explicatif de la méthode de défuzzification des barycentres pondérés pour une valeur d'entrée de 1	114
Figure 41 : Règles floues définies pour le calcul du clickCorrection en fonction de la précision des mains et de l'acuité visuelle	116
Figure 42 : Menus avec texte et icônes.....	119
Figure 43 : Menus avec seulement du texte	119
Figure 44 : Présentation Standard et complète (verbo­sité par défaut).....	119
Figure 45 : Présentation courte (verbo­sité concise)	119
Figure 46 : Menu avec un haut niveau de guidage	120
Figure 47 : Interacteurs avec des zones de clics étendues (correction haute)	120
Figure 48 : Agrandissement de la taille de police de caractères.....	120
Figure 49 : Histogramme présentant le nombre de réponses d'experts identiques ou assimilées à chaque logique	128

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison des travaux de l'Etat de l'Art en fonction des critères ciblés.....	73
Tableau 2 : Synthèse de l'analyse théorique comparative entre logique booléenne et logique floue	121
Tableau 3 : Tableau fourni aux experts	124
Tableau 4 : Réponses des experts - Groupes de règles G1 à G3	125
Tableau 5 : Réponses des experts - Groupes de règles G4 et G5	126
Tableau 6 : Synthèse des avis d'experts.....	132

Introduction

1 Contexte

L'utilisation de l'informatique s'impose de plus en plus dans la vie quotidienne, notamment à travers Internet. On peut penser, par exemple, à la diffusion massive des réseaux sociaux, à l'accès aux comptes bancaires, aux déclarations d'impôts, ou encore aux prises de rendez-vous médicaux. Ceci est d'autant plus vrai depuis l'apparition de la pandémie de COVID-19, qui a entraîné un grand nombre de changements de comportements, le plus notable étant probablement due à la période de confinement obligatoire instaurée en France et dans de nombreux autres pays. Durant cette période de confinement, 95% des entreprises françaises ont eu recours au télétravail pour les salariés éligibles [Enquête ANDRH 2020], et 44% des Français ont utilisé Internet pour leurs loisirs [Sondage Odoxa-CGI 2020] avec des résultats très homogènes selon l'âge : les personnes âgées de 65 ans et plus ont ainsi autant surfé sur Internet que les moins de 25 ans. Internet a, en particulier, servi à échanger avec des proches pour 38% des Français (48% des 65 ans et plus) [Sondage Odoxa-CGI 2020]. Suite au confinement, le télétravail est resté la norme pour 24% des français [Sondage Odoxa-CGI 2020], et des recommandations sont toujours en vigueur pour les personnes « à risque », en particulier les personnes âgées, telles que limiter les visites à l'essentiel et éviter au maximum le contact avec les enfants (incluant donc leurs petits-enfants). Ces recommandations risquent toutefois d'augmenter encore plus l'isolement social déjà souvent ressenti par les personnes âgées, et qui est un problème de santé publique important, se traduisant par un risque accru de décès prématuré [Holt-Lunstad et al. 2015].

En France, le code de l'action sociale et des familles promeut l'utilisation des technologies numériques pour prévenir l'isolement, notamment dans l'article L233-1 de la loi 2015-1776 du 28 décembre 2015. Pourtant, le Haut Conseil de la Famille, de l'Enfance et de l'Âge, dans son rapport du 16 mai 2019 [HCFEA 2019], note l'existence d'une "fracture numérique" qui atteint "certains territoires [et] certains publics fragiles". Cette fracture retranscrit la difficulté d'une part importante de la population à utiliser l'outil informatique et constitue un facteur supplémentaire d'isolement. Ces personnes – notamment les personnes en difficulté neurocognitive ou les personnes âgées – montrent en effet une forte anxiété et un sentiment d'incompétence vis-à-vis de ces dispositifs [Quillion-Dupré et al. 2018]. Par rapport à la population générale, elles ont besoin de plus de temps pour s'approprier l'utilisation d'une nouvelle technologie et requièrent plus d'aide et d'entraînement [Quillion-Dupré et al. 2018].

Si l'accompagnement humain est un facteur important de succès pour permettre à ces personnes d'accéder à l'usage des outils informatiques [Berner 2014], la facilité d'utilisation des dispositifs est un point critique pour en favoriser l'adoption [Alm et al. 2007] : les difficultés vécues par ces utilisateurs posent de façon plus aiguë la question de l'accessibilité numérique et plus particulièrement l'accessibilité du web. L'accessibilité du web est définie par le W3C comme les moyens à mettre en œuvre pour « permettre un accès égal et des opportunités égales à tous les utilisateurs », afin notamment de « rendre possible une égale participation des personnes handicapées » [W3C – Web Accessibility Initiative 2015]. Selon Tim Berners-Lee, directeur du W3C et inventeur du web, « The power of the web is in its universality. Access by everyone regardless of disability is an essential aspect ».

Cependant, la Classification Internationale pour le Fonctionnement, le Handicap et la Santé de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) [CIF 2001] insiste fortement sur le fait que le handicap est une limite imposée à l'engagement de la personne dans des activités, révélée, accrue ou allégée par des facteurs socio-environnementaux persistants ou ponctuels. Ainsi une personne atteinte de dégradation neurocognitive pourrait confortablement préparer ses repas ou discuter avec un membre de sa famille (des routines acquises depuis des années) tandis qu'elle aurait le plus grand mal à acquérir les bases d'usage d'un dispositif informatique : il s'agit alors d'une situation persistante. Une autre personne pourrait avoir assimilé l'envoi de mails, mais se trouver totalement impuissante lorsque le système lui afficherait un message urgent concernant une mise à jour, une difficulté ponctuelle ou un handicap situationnel [Wobbrock 2019].

Au regard de ces situations, un besoin d'accompagnement se fait ressentir. Il est possible de répondre à ce besoin grâce à la prise en compte des limitations de l'utilisateur par les dispositifs informatiques, que ces limitations soient durables ou ponctuelles, propres à l'utilisateur ou dues à la situation courante de celui-ci. En ce sens, dans certaines situations, l'accessibilité peut être vue comme un besoin d'adaptation de l'interface à la situation courante. Ainsi l'adaptation des interfaces utilisateurs devient un enjeu crucial des systèmes accessibles du futur. En matière d'adaptation, la littérature distingue les systèmes adaptables et adaptatifs [Thevenin et al. 2003]. Un système adaptable « est personnalisable sur intervention explicite de l'utilisateur qui peut agir sur les paramètres fixés par le concepteur », alors qu'un système adaptatif « est doué de discrimination. Il sait reconnaître la situation (parmi plusieurs déclencheurs fixés par le concepteur) et adopte la réaction (recommandation) fixée elle aussi par le concepteur pour cette situation. Mais le système est incapable d'évaluer l'effet de sa réaction ».

Que le système soit adaptatif ou adaptable, une des difficultés réside dans la mise en œuvre des recommandations d'accessibilité. Comme nous le détaillerons dans le chapitre I, ce sont souvent des principes généraux ("le contenu doit être lisible par un enfant" d'environ quatorze ans [Loranger 2017]) et statiques ("le ratio de contraste recommandé est 4,5:1" [WCAG 2008]), parfois complexes à combiner, voire contradictoires. Adapter une interface utilisateur à la situation ou au handicap ponctuel ne peut pas se faire sur la base de principes statiques : l'interface utilisateur doit réagir à la situation présente avec toute sa complexité, pour maintenir le niveau de service offert et préserver l'utilisabilité [Thevenin et al. 1999]. Il est donc difficile de concevoir et de réaliser des interfaces accessibles et adaptables au contexte d'usage (le triplet <utilisateur, plate-forme, environnement> [Calvary et al. 2003]).

2 Problématique et question de recherche

De nombreux travaux ont déjà traité des Interfaces Homme-Machine (IHM) adaptables ou adaptatives, des années quatre-vingt [Edmonds 1981 ; Schneider-Hufschmidt et al. 1993 ; Kolski et al. 1998], jusqu'à récemment [Chesta et al. 2004 ; Florins 2006 ; Sottet et al. 2007 ; Hariri et al. 2008 ; Blumendorf et al. 2008 ; Firmenich et al. 2011 ; Nguyen et al. 2016]. Néanmoins, ces approches sont souvent complexes, comme l'illustrent les travaux en Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) [Whittle et al. 2014], largement explorées dans la littérature [Thevenin et al. 2003 ; Miñon et al. 2016 ; Paternò et al. 2009]. De plus, des verrous scientifiques demeurent, en particulier si l'adaptation prend en compte l'utilisateur et pas seulement la plate-forme et l'environnement [Miñon et al. 2016 ; Yigitbas et al. 2017 ; Abrahão et al. 2017].

D'autres travaux se sont plus particulièrement penchés sur l'amélioration de l'accessibilité des IHM pour les utilisateurs [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017 ; Yang et al. 2007 ; Kolekar et al. 2018]. Toutefois, les adaptations proposées restent généralement relativement simples, avec un nombre peu conséquent de règles, et se basant sur un nombre relativement faible de caractéristiques utilisateurs (dyslexie, acuité visuelle, ...) et du contexte d'usage en général. Cela est problématique car une gestion globale de l'accessibilité des utilisateurs nécessite de prendre en compte un nombre important de caractéristiques du contexte d'usage et en particulier de caractéristiques utilisateurs, ainsi qu'un grand nombre de règles d'adaptation afin de prendre en compte la diversité des caractéristiques des utilisateurs, des plateformes qu'ils utilisent, et des situations possibles (par exemple, devant un ordinateur de bureau, ou dans la rue avec un smartphone).

Nous avons ainsi établi qu'il reste, *a minima*, quatre verrous :

1. La multiplicité des caractéristiques du contexte d'usage, et en particulier du modèle de l'utilisateur : le cluster Virtual User Modelling and Simulation [VUMS 2013] a identifié plus de 250 caractéristiques utiles pour simuler un utilisateur humain, en ne focalisant que sur les caractéristiques physiques de l'humain ;
2. L'imprécision ou l'incertitude des valeurs attribuées à ces caractéristiques, que cette évaluation soit faite par capture (on peut par exemple inférer l'âge de l'utilisateur à partir d'une image prise par sa caméra, mais la précision est inférieure à 50% [Jung et al. 2018]) ou par déclaration (on peut demander à l'utilisateur de déclarer son acuité visuelle, mais l'incertitude sur la valeur collectée est ici aussi élevée [Jasberg et al. 2018]) ;
3. Le niveau de complexité des règles d'adaptation, qui, associées à de multiples caractéristiques du contexte d'usage, peuvent devenir problématique à maintenir. En effet, « à mesure que le nombre de variables augmente dans la prémisse [d'une] règle, il devient de plus en plus difficile pour des humains de comprendre [cette] règle » [Jin 2000].
4. La combinaison des règles d'adaptation : prendre en compte les multiples caractéristiques du contexte d'usage nécessite, sous une forme ou une autre (transformations de modèles, patrons de solutions, règles logiques, etc.), de définir de multiples règles d'adaptation, puis de les combiner pour obtenir une solution en résolvant à la fois le compromis entre les différentes règles et la gestion performante de cette combinatoire [Yang et al. 2007].

Nous abordons ces verrous au travers de la question de recherche suivante : comment améliorer l'accessibilité des IHM web par le biais d'interfaces adaptatives en prenant en compte la multiplicité des caractéristiques du contexte, l'imprécision des valeurs de contexte ainsi que la complexité et la combinaison des règles ?

3 Objectifs

Pour aborder cette question de recherche, nous explorons l'utilisation de la logique floue. La logique floue peut être vue comme une extension de la logique booléenne classique, permettant

de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision des valeurs des caractéristiques utilisées : alors que la logique classique ne considère que deux valeurs (« vrai » et « faux »), la logique floue considère un ensemble infini de valeurs réelles entre 0 (faux) et 1 (vrai). Cette logique a été introduite par Zadeh [Zadeh 1965] afin de se rapprocher du raisonnement humain, ce qui permet d'écrire des règles plus proches du langage naturel, au sens où elle est capable de traiter certaines ambiguïtés du langage naturel [Hersh et al. 1976].

Les travaux présentés dans ce mémoire ont pour objectif principal d'étudier les apports potentiels de la logique floue pour l'adaptation des interfaces homme-machine dans un contexte de favorisation de l'accessibilité. Ils ont permis de proposer Fuzzy4U, une architecture d'adaptation dynamique des IHM pour l'accessibilité basée sur un moteur d'adaptation en logique floue. Nous avons orienté ces travaux autour des objectifs suivants :

Objectif 1. Le premier objectif était de mieux prendre en compte l'accessibilité dans les systèmes interactifs en proposant d'adapter l'interface au contexte d'usage de l'utilisateur. Dans ce but, nous avons porté une attention particulière aux caractéristiques de l'utilisateur, point qui n'a généralement que peu été traité dans les travaux sur l'adaptation des IHM.

Objectif 2. Le deuxième objectif de la thèse a été de montrer qu'il était techniquement possible de concevoir et réaliser un système d'adaptation basé sur la logique floue. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps défini une architecture logicielle comportant un moteur d'adaptation qui s'appuie sur un outil de logique floue. Cette architecture a ensuite été utilisée pour la réalisation d'un prototype supportant un cas d'étude réaliste afin de montrer la faisabilité de l'approche. Nous avons en particulier amélioré la prise en charge de l'incertitude du contexte d'usage, notamment celle liée à l'imprécision des caractéristiques de l'utilisateur (verrou 2).

Objectif 3. Le troisième objectif de la thèse était de montrer qu'un moteur d'adaptation en logique floue permet de mieux gérer les autres verrous que nous avons identifiés, que la logique binaire. L'approche doit donner les moyens de mieux passer à l'échelle, en prenant en compte plus facilement la multiplicité des caractéristiques du contexte (verrou 1), la complexité des règles (verrou 3) et leur combinaison (verrou 4). Pour atteindre cet objectif, nous avons mené une comparaison en deux temps : dans un premier temps, nous avons effectué une étude comparative théorique, puis nous avons confronté les préconisations obtenues en logique floue à l'avis d'experts dans le domaine de l'IHM.

4 Structure de la thèse

La structure de cette thèse est la suivante. Dans le **chapitre I**, nous commençons par définir les notions d'accessibilité et de handicap, et comment ces notions sont liées. Nous détaillons ensuite les différentes barrières à l'accessibilité, notamment liées à des handicaps ou des situations problématiques pour l'utilisateur. Enfin, nous détaillons des recommandations d'accessibilité du web, et comment elles permettraient d'améliorer l'accessibilité de l'IHM dans le cadre d'un exemple fil rouge.

Nous présentons dans le **chapitre II** une analyse de différents travaux de la littérature, incluant des travaux focalisés sur l'accessibilité, des travaux d'adaptation des IHM et des travaux utilisant la logique floue.

Au sein du **chapitre III**, nous continuons par présenter différentes limites de la logique booléenne, souvent utilisée dans le domaine, ainsi que le fonctionnement de la logique floue, ayant les capacités de résoudre les différents verrous énoncés. Nous détaillons ensuite l'architecture logicielle ainsi que l'implémentation de notre système en logique floue pour l'amélioration de l'accessibilité des IHM par l'adaptation, Fuzzy4U, avant de montrer comment des recommandations d'accessibilité peuvent être traduites en règles d'adaptation et leur exécution.

Enfin, dans le **chapitre IV**, nous présentons comment la logique floue permet de répondre aux verrous identifiés : l'incertitude des données, la complexité des règles, ainsi que leur combinaison. Afin de valider ces avantages, nous présentons une analyse comparative entre la logique booléenne et la logique floue au travers d'une comparaison théorique des résultats, suivie d'une comparaison basée sur des avis d'experts.

Chapitre I

Accessibilité

I. Accessibilité

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, l'accessibilité du web est un point central de cette thèse. Afin de comprendre les problématiques liées à l'accessibilité, ce chapitre débutera par définir le handicap et situer l'accessibilité par rapport au concept d'utilisabilité, central en IHM. Dans cette section, nous en verrons différentes définitions et nous définirons ce que nous entendons par ce terme dans cette thèse.

1 Handicap

1.1 Définition du handicap par l'OMS

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) a élaboré, en 2001, la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé (CIF) [WHO 2001] ayant pour but de fournir un langage uniformisé et normalisé ainsi qu'un cadre pour la description des états de la santé (comprenant la vision, l'audition, la marche, l'apprentissage, la mémoire, ...) et des états connexes de la santé (la mobilité, l'éducation, les interactions en société, ...). Selon cette classification, ces deux domaines (états de santé et états connexes de santé) peuvent être décrits selon les points de vue de l'organisme, de la personne en tant qu'individu, ou de la personne en tant qu'être social, selon : 1) les fonctions organiques et les structures anatomiques ; 2) les activités et la participation (voir Figure 1).

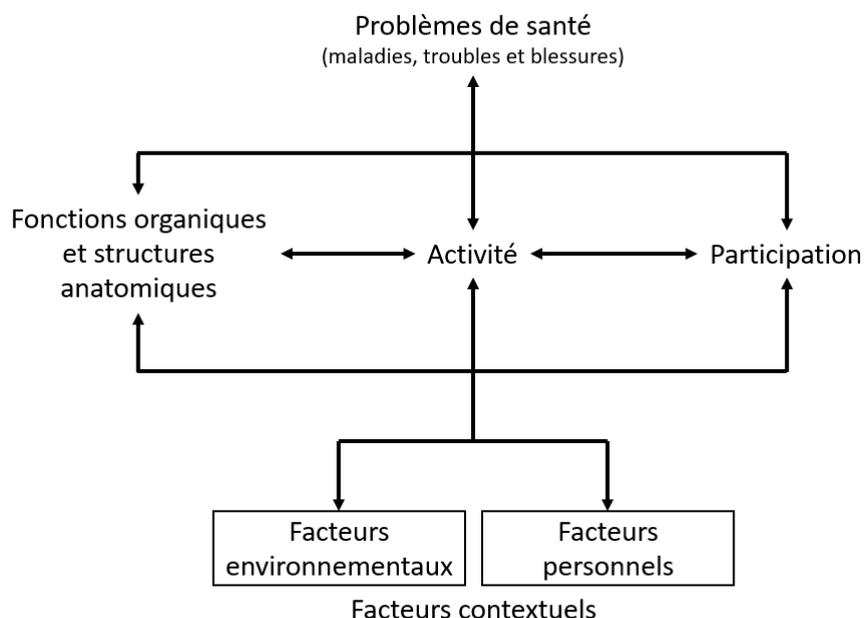
Les fonctions organiques et structures anatomiques décrivent le fonctionnement au niveau du corps ou d'une partie du corps. Les fonctions organiques sont des fonctions physiologiques des systèmes corporels, tels que la vue, l'ouïe, l'attention, l'équilibre. Le terme « organique » se référant à l'ensemble de l'organisme humain, il englobe ainsi le cerveau et ses fonctions. Les structures anatomiques sont, quant à elles, des parties physiques du corps telles que les organes, les membres et leurs composants.

L'activité décrit le fonctionnement au niveau de la personne entière. Elle traduit la *capacité* d'exécution d'une tâche ou d'une action donnée par un individu, dans un environnement « normalisé » qui neutraliserait les influences variables qui s'exercent dans des environnements particuliers sur chaque personne.

La participation décrit le fonctionnement au niveau de la personne entière dans un contexte social donné. Elle représente le niveau de *performance* dans l'exécution d'une tâche ou d'une action donnée, par un individu, dans une situation de la vie réelle. Par exemple, une personne guérie après un traitement pour troubles mentaux pourrait subir une discrimination dans ses relations professionnelles, et avoir ainsi une baisse de performance dans la réalisation de son travail (Participation), alors qu'elle pourrait en avoir la capacité dans un environnement plus serein (Activité).

La Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé ne se limite pas à traiter du « handicap » d'un individu, terme générique regroupant les déficiences, les limitations d'activités ou les restrictions de participation, mais aussi du « fonctionnement », se rapportant aux fonctions organiques, aux activités de la personne (sa capacité) et à sa participation au sein de la société (sa performance).

Figure 1 : Modèle de fonctionnement utilisé par la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé



Comme l'indique la Figure 1, le handicap et le fonctionnement sont considérés dans la Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé comme le résultat des interactions entre les problèmes de santé (maladies, troubles et blessures) et les facteurs contextuels qui représentent les circonstances de vie de cette personne. Parmi ces derniers, les facteurs environnementaux, externes, comprenant le monde physique et ses caractéristiques, le monde physique bâti par l'homme, les autres individus, les valeurs, les attitudes, les règles, les lois, le climat ou encore la luminosité ; et 2) les facteurs personnels, internes, comprenant le sexe, l'âge, la condition sociale, l'éducation, les expériences de vie, le caractère et d'autres facteurs qui influencent la façon dont le handicap est vécu par l'individu. Des environnements différents peuvent en effet avoir des impacts variables sur un individu donné dans un état de santé donné. Par exemple, une personne arthritique peut n'avoir que de légers problèmes lors de l'utilisation de son téléphone lorsqu'elle est chez elle, mais ne pas pouvoir l'utiliser en extérieur par temps froid à cause des douleurs supplémentaires que cela entraîne.

Le handicap implique donc un dysfonctionnement à un ou plusieurs de ces trois niveaux :

1. Déficiences : ce sont des problèmes de fonction organique ou de structure anatomique, comme une déviation (ex : malformation d'une main) ou une perte importante (ex : une personne manchote) ;
2. Limitations d'activités : ce sont des difficultés qu'une personne peut rencontrer dans l'exécution de ses activités (ex : difficulté importante pour cette personne à naviguer sur le web sans avoir recours à des aides techniques) ;
3. Restrictions de participation : ce sont des problèmes qu'un individu peut rencontrer dans sa participation à des situations de la vie (ex : légère difficulté pour cette personne à naviguer sur le web, en utilisant des aides techniques).

Ces situations de handicap peuvent en particulier être causées par l'utilisation de l'outil numérique comme discuté en introduction. Face à ce constat, le domaine de l'IHM s'est intéressé au domaine du handicap afin de proposer des technologies plus utilisables dans des situations diverses.

1.2 Définitions du handicap en IHM

Andrew Sears et Mark Young ont été les premiers à parler en IHM de « déficiences et incapacités induites par la situation » (SIID, pour Situationally-Induced Impairments and Disabilities) [Sears et al. 2003]. Ils avancent en effet que l'environnement dans lequel une personne évolue ainsi que le contexte courant peuvent induire ou renforcer des déficiences, des limitations d'activité et des restrictions de participation. Un individu n'ayant pas de handicap au sens médical du terme peut tout de même se retrouver confronté à des difficultés similaires à celles engendrées par un handicap. Des travaux [Sarsenbayeva et al. 2016 ; Goncalves et al. 2017] ont par exemple permis de mettre en évidence les effets du froid dans le cadre d'une interaction homme-machine, se traduisant par une baisse de la précision et de la rapidité pour atteindre des cibles.

Un second article de Sears en 2003 [Sears et al. 2003] s'est concentré sur la pertinence des déficiences et incapacités induites par la situation pour l'informatique ubiquitaire : à mesure que l'informatique est intégrée dans les objets de tous les jours, les situations rencontrées par les utilisateurs deviennent de plus en plus variables, avec par exemple une utilisation nomade, en forte hausse, et induisant des environnements potentiellement très différents et changeants en termes de froid, bruit, luminosité, mouvement, etc. En conséquence, les déficiences et incapacités induites par la situation deviendront de plus en plus courantes, les IHM jouant de ce fait un rôle de plus en plus important. L'environnement et les activités dans lesquelles la personne est engagée peuvent conduire à des déficiences et incapacités induites par la situation. Des travaux ont en effet été réalisés pour étudier les conditions d'utilisation d'appareils mobiles afin de déterminer l'impact des déficiences et incapacités induites par la situation sur l'interaction [Kane et al. 2008 ; Qian et al. 2013 ; Schildbach et al. 2010]. Par exemple, [Schildbach et al. 2010] a étudié la lecture et le ciblage à l'aide d'un appareil à écran tactile et a montré que les performances diminuaient et que la charge de travail cognitive augmentait considérablement en marchant par rapport à une position debout fixe.

Les deux articles de Sears se sont inspirés de l'OMS pour distinguer les déficiences, les incapacités (limitations d'activités) et les handicaps (restrictions de participation). En accord avec cette vision, nos travaux aborderont ces différents points de vue pour proposer des adaptations de l'interface visant à réduire les effets négatifs d'une situation.

Dans cette perspective, en 2006, Wobbrock a suggéré des opportunités de conception qui pourraient aider à réduire les impacts négatifs des déficiences et incapacités induites par la situation [Wobbrock 2006] :

Ultimately, it should be feasible to construct devices and interfaces that automatically adjust themselves to better accommodate situational impairments. A device could sense environmental factors like glare, light levels, temperature, walking speed, gloves, ambient noise —perhaps even user attention and distraction— and adjust its displays

and input mechanisms accordingly. For example, imagine a device that is aware of cold temperatures, lowlight levels, and a user who is walking and wearing gloves. The device could automatically adjust its contrast, turn on its backlight, and enlarge its font and soft buttons so as to make the use of a stylus unnecessary. If it detects street noise it could raise the volume of its speakers or go into vibration mode. In short, understanding situational impairments presents us with opportunities for better user models, improved accessibility, and adaptive user interfaces.

Une majorité des travaux se penchant sur les déficiences et incapacités induites par la situation le font dans le cas de l'utilisation d'un smartphone [Sears et al. 2003 ; Jupp et al. 2007 ; Nicolau 2012 ; Saulynas et al. 2019 ; Sarsenbayeva et al. 2019 ; Tigwell et al. 2019]. Cette modalité d'interaction, en forte croissance [GlobalWebIndex 2019], peut effectivement entraîner un grand nombre de déficiences et incapacités induites par la situation, du fait de la diversité des situations et environnements possibles [Barnard et al. 2007]. Par exemple, des travaux montrent qu'utiliser un smartphone en marchant réduisait la vitesse de lecture comme nous l'avons déjà mentionné [Mustonen et al. 2004], mais aussi la précision moteur [Chamberlain et Kalawsky 2004 ; Lin et al. 2005 ; Lin et al. 2007 ; Schedlbauer et al. 2007], le niveau d'attention [Bragdon et al. 2011 ; Oulasvirta et al. 2005], ainsi que la capacité d'une personne à manœuvrer et éviter des obstacles [Vadas et al. 2006]. Toutefois, il est aussi possible de rencontrer des déficiences et incapacités induites par la situation lors de l'utilisation d'un ordinateur de bureau, par exemple au niveau de l'utilisateur (un oubli de lunettes) ou de l'environnement (trop bruyant ou lumineux).

Malgré le temps passé depuis que ces idées ont été proposées, et la démocratisation des appareils portables/connectés/intelligents, les IHM proposées sur ces dispositifs restent encore éloignées d'une prise en compte du contexte d'usage des utilisateurs. C'est en particulier le cas pour les sites web qui représentent la majeure partie des situations d'interaction actuelles.

2 L'accessibilité et ses barrières

2.1 Définition du World Wide Web Consortium

La prise en compte de situations de handicap dans le cadre d'Internet relève de la notion d'accessibilité. Selon le World Wide Web Consortium (W3C), l'accessibilité du web signifie que « les sites web, les outils et les technologies sont conçus et développés de façon à ce que les personnes atteintes de handicaps puissent les utiliser » [W3C – Introduction to Web Accessibility]. Ces personnes doivent pouvoir percevoir, comprendre, naviguer, interagir avec et contribuer sur le web.

L'accessibilité est, en particulier, étudiée par le W3C qui est chargé de promouvoir la compatibilité des technologies web par la standardisation. Cette sous-partie détaille la vision de l'accessibilité du W3C.

L'accessibilité du web englobe tous les handicaps pouvant affecter l'accès au web, et en particulier : les handicaps auditifs, les troubles cognitifs, d'apprentissage et neurologiques, les handicaps physiques, les troubles de la parole, les déficiences visuelles. Ces différents handicaps et leur prise en compte dans le cadre du web sont décrits ci-dessous, afin de donner une vue d'ensemble des barrières possibles à l'accessibilité du web [W3C – Diverse Abilities and Barriers].

Handicap auditif : Les handicaps auditifs vont de la perte légère de l'audition dans une ou deux oreille(s) (malentendance) à une perte substantielle et bilatérale de l'audition, impossible à corriger (surdité). Certaines personnes atteintes de troubles auditifs peuvent entendre des sons mais pas forcément suffisamment pour comprendre la parole, en particulier dans un environnement bruyant. Cela peut inclure les personnes portant des aides auditives.

Bien que le multimédia sur le web fournisse de nombreuses possibilités aux personnes atteintes de handicap auditif, il pose aussi des difficultés quand le contenu n'a pas été conçu de façon accessible. Par exemple, une vidéo peut être utilisée pour véhiculer de l'information visuellement, auquel cas le contenu audio associé doit exister sous formes alternatives, comme une transcription ou des sous-titres, afin d'être accessible à des personnes atteintes de handicap auditif.

Pour pouvoir utiliser correctement le web, les personnes atteintes de handicap auditif s'appuient souvent sur :

- Des transcriptions et des sous-titres des contenus audio, y compris des contenus uniquement audio et des pistes audio dans des contenus multimédias ;
- Des lecteurs de media qui affichent les sous-titres et donnent des options pour ajuster la taille et la couleur des sous-titres ;
- Des options pour arrêter, mettre en pause, et ajuster le volume du contenu audio (indépendantes du volume du système) ;
- Une piste audio de premier plan de bonne qualité, facilement distinguable de tout bruit de fond.

Pour certaines personnes atteintes de handicap auditif, le W3C précise que la langue des signes est la première langue, et elles peuvent ne pas lire couramment la langue écrite. Fournir les informations importantes en langue des signes et utiliser un texte plus simple accompagné d'images, de graphes et d'autres illustrations aide à rendre le contenu web plus compréhensible à plus de monde. Cependant, il est important de se souvenir que toutes les personnes atteintes de handicap auditif ne maîtrisent pas la langue des signes.

Trouble cognitif, d'apprentissage et neurologique : ces trois troubles impliquent la neurodiversité et les troubles neurologiques, ainsi que les troubles du comportement et de la santé mentale qui ne sont pas nécessairement neurologiques. Ils peuvent affecter n'importe quelle partie du système nerveux et affecter la façon dont les gens entendent, bougent, voient, parlent et comprennent les informations. Les troubles cognitifs, d'apprentissage et neurologiques n'affectent pas nécessairement l'intelligence d'une personne. Ils sont nombreux et disparates, comprenant les troubles d'hyperactivité avec déficit de l'attention, les troubles du spectre autistique, les troubles d'apprentissages, les troubles de la santé mentale, les troubles de la mémoire, la sclérose en plaque, les troubles de la perception, les troubles épileptiques, etc.

Les technologies informatiques et le web offrent de nombreuses possibilités aux personnes souffrant de troubles cognitifs, d'apprentissage et neurologiques pour interagir avec le contenu et traiter les informations d'une manière plus utilisable pour elles. Par exemple, les utilisateurs

peuvent naviguer sur le contenu web à l'aide de différentes stratégies, accéder aux informations sous forme de texte, audio ou d'autres formats et modifier la présentation du contenu en fonction de leurs besoins ou préférences individuels.

Selon les besoins individuels, les personnes souffrant de troubles cognitifs, d'apprentissage et neurologiques comptent souvent sur :

- Un contenu clairement structuré qui facilite la vue d'ensemble et l'orientation ;
- Un étiquetage cohérent des formulaires, boutons et autres éléments de contenu ;
- Des cibles de lien, des fonctionnalités et une interaction globale prévisibles ;
- Différentes façons de naviguer sur les sites web, telles que le menu hiérarchique et la recherche ;
- Des options pour supprimer le contenu clignotant, scintillant, ou autres types de contenu pouvant distraire ;
- Une version simplifiée du texte, complétée par des images, des graphiques et d'autres illustrations.

Les personnes souffrant de troubles cognitifs, d'apprentissage et neurologiques utilisent différents techniques d'aide à la consultation de pages web, en fonction de leurs besoins particuliers. Par exemple, le W3C indique que certaines personnes utilisent un logiciel de synthèse vocale pour entendre les informations tout en les lisant visuellement ou utilisent des légendes pour lire les informations tout en les entendant. Certaines personnes utilisent des fonctionnalités ou des outils permettant de redimensionner le texte (option généralement disponible au sein même du navigateur web, ou même du système d'exploitation) ou de personnaliser les couleurs pour faciliter la lecture (par exemple via le plugin *High Contrast*, pour le navigateur Google Chrome). D'autres utilisent des outils de grammaire et d'orthographe pour aider à l'écriture (tel que *Grammarly*, un plugin pour le navigateur Mozilla Firefox). Pour que ces techniques d'aide à la consultation de pages web fonctionnent, les développeurs doivent tenir compte des exigences d'accessibilité web qui sont souvent partagées par des personnes souffrant de déficiences auditives, physiques, vocales et visuelles.

Handicap physique : Les handicaps physiques comprennent la faiblesse et les limitations du contrôle musculaire (telles que les mouvements involontaires, y compris les tremblements, le manque de coordination ou la paralysie), les limitations de la sensation, les troubles articulaires (tels que l'arthrite), la douleur qui entrave le mouvement, et les membres manquants. Ils comprennent l'arthrite, les amputations, la fibromyalgie (un syndrome caractérisé par des douleurs diffuses dans tout le corps, associées à une fatigue importante et à des troubles du sommeil), les rhumatismes, la dextérité réduite, la dystrophie musculaire (une maladie musculaire caractérisée par une faiblesse et une dégénérescence musculaire progressive), les tremblements et spasmes...

Pour utiliser le web, les personnes handicapées physiques utilisent souvent du matériel et des logiciels spécialisés tels que :

- Un clavier (ou une souris) ergonomique ou spécialement conçu ;
- Un *Head Wand* (voir Figure 2), bâton buccal ou autres aides pour taper au clavier ;
- Un clavier virtuel (à l'écran) avec trackball, joysticks ou autres dispositifs de pointage ;
- Des interrupteurs actionnés par le pied, l'épaule ou d'autres mouvements ;
- Une reconnaissance vocale, un suivi des yeux ou d'autres approches permettant une interaction mains libres.

Figure 2 : Un *Head Wand*, ayant pour but d'aider une personne en situation de handicap physique à utiliser un clavier



Les personnes handicapées physiques peuvent parfois n'utiliser qu'une souris (ou un périphérique similaire à la souris), ou qu'un clavier (ou un périphérique similaire au clavier) pour interagir avec l'ordinateur. Ces personnes peuvent compter sur la prise en charge du clavier pour activer les fonctionnalités fournies sur les pages web. Ils peuvent avoir besoin de plus de temps pour taper, cliquer ou effectuer d'autres interactions, et ils peuvent taper des séquences de touches uniques plutôt que de taper des touches simultanées pour activer les commandes. Ces séquences de frappes comprennent des commandes pour les caractères spéciaux, les raccourcis clavier et les éléments de menus actifs.

Les personnes handicapées physiques peuvent avoir du mal à cliquer sur de petites zones et sont plus susceptibles de faire des erreurs de frappe et de clic. Par exemple, dans le cas où de nombreux éléments cliquables sont particulièrement proches les uns des autres, il peut être difficile pour ces utilisateurs de cliquer sur un lien en particulier du fait de leur potentiel manque de précision à la souris (voir Figure 3). Afin d'améliorer l'accessibilité du web pour ces personnes, le W3C recommande de fournir de grandes zones cliquables, suffisamment de temps pour terminer les tâches et des options de correction d'erreurs pour les formulaires, qui sont des aspects de conception importants. D'autres aspects importants de la conception incluent de fournir des indicateurs visibles du focus actuel et des mécanismes pour ignorer les blocs, tels que

les en-têtes de page ou les barres de navigation. Les personnes handicapées cognitives et visuelles partagent bon nombre de ces exigences.

Figure 3 : Un site web manquant d'accessibilité pour des utilisateurs ayant une faible précision des mains

The screenshot shows the Craigslist Los Angeles homepage. The layout is dense with many small, closely spaced links and text elements. Key features include:

- Header:** "los angeles" with location filters (wst, sfv, lac, sg, lgb, ant) and a language dropdown set to "english".
- Left Sidebar:** "craigslist" logo, "create a posting", "my account", "search craigslist" box, "event calendar" (a calendar grid), and various utility links like "craigslist app", "help, faq, abuse, legal", "avoid scams & fraud", "personal safety tips", "terms of use", "privacy policy", and "system status".
- Main Content Area:** Three columns of category lists:
 - community:** activities, artists, childcare, classes, events, general, groups, local news, lost+found, missed, connections, musicians, pets, politics, rants & raves, rideshare, volunteers.
 - housing:** apts / housing, housing swap, housing wanted, office / commercial, parking / storage, real estate for sale, rooms / shared, rooms wanted, sublets / temporary, vacation rentals.
 - jobs:** accounting+finance, admin / office, arch / engineering, art / media / design, biotech / science, business / mgmt, customer service, education, etc / misc, food / bev / hosp, general labor, government, human resources, legal / paralegal, manufacturing, marketing / pr / ad, medical / health, nonprofit sector, real estate, retail / wholesale, sales / biz dev, salon / spa / fitness.
 - services:** automotive, beauty, cell/mobile, computer, creative, cycle, event, farm+garden, financial, household, labor/move, legal, lessons, marine, pet, real estate, skilled trade, sm biz ads, travel/vac, write/ed/tran.
 - for sale:** antiques, appliances, arts+crafts, atv/utv/sno, auto parts, aviation, baby+kid, barber, beauty+hilth, farm+garden, free, furniture, garage sale, general, heavy equip, household, jewelry, materials.
- Right Sidebar:** "nearby ci" dropdown menu listing various cities like bakersfield, chico, flagstaff, fresno, gold country, hanford, imperial co, inland empire, las vegas, merced, modesto, mohave co, monterey, orange co, palm springs, phoenix, prescott, reno, sacramento, san diego, san luis obispo, santa barbara, santa maria, sf bay area, st george, stockton.

Trouble de la parole : Les troubles de la parole comprennent la difficulté à produire un discours reconnaissable par d'autres ou par un logiciel de reconnaissance vocale. Par exemple, le volume ou la clarté de la voix d'une personne peut être difficile à comprendre. Ils regroupent l'apraxie de la parole (un trouble neurologique affectant la planification et la programmation motrice de la parole, c'est-à-dire la capacité du cerveau à prévoir les sons à produire), la tachyphémie (un trouble de la parole au cours duquel le malade a tendance à accélérer progressivement le débit de son élocution), la dysarthrie (une maladie caractérisée par une faiblesse ou une perte de contrôle des muscles respiratoires, du palais, du pharynx et de la langue, entraînant un discours lent ou difficile à comprendre), le bégaiement, ou encore le mutisme.

Les personnes souffrant de troubles de la parole rencontrent des obstacles avec les services vocaux, tels que les services d'assistance (hotline) web automatisés et les applications web qui sont utilisées à l'aide de commandes vocales. Pour utiliser des services qui reposent sur la voix, les personnes souffrant de troubles de la parole ont besoin de modes d'interaction alternatifs tels qu'une conversation textuelle pour interagir avec des représentants du service d'assistance et des commandes clavier pour faire fonctionner les applications web. De plus, les sites web qui fournissent des numéros de téléphone comme seul moyen de communiquer avec une organisation posent des obstacles aux personnes souffrant de troubles de la parole. Les moyens de communication alternatifs incluent le courrier électronique et les formulaires de commentaires.

Déficience visuelle : Les déficiences visuelles vont d'une perte de vision légère ou modérée dans un œil ou dans les deux (malvoyance) à une perte de vision substantielle et non corrigible dans les deux yeux (cécité). Certaines personnes ont une sensibilité réduite ou insuffisante à certaines couleurs (daltonisme ou cataracte), ou une sensibilité accrue aux couleurs vives

(photosensibilité). Ces variations de perception des couleurs et de la luminosité peuvent être indépendantes de l'acuité visuelle.

Les personnes ayant une déficience visuelle comptent généralement sur la modification de la présentation du contenu web en des formes correspondant mieux à leurs besoins particuliers. Par exemple par :

- Agrandissement ou réduction de la taille du texte et des images ;
- Personnalisation des paramètres de polices, de couleurs et d'espacement ;
- Écouter la synthèse texte-parole du contenu ;
- Écoute de descriptions audio de vidéos en multimédia ;
- Lecture de texte grâce à une plage braille.

Pour que ces techniques d'aide à la consultation de pages web fonctionnent, les développeurs doivent s'assurer que la présentation du contenu web est indépendante de sa structure sous-jacente et que la structure est correctement codée afin qu'elle puisse être traitée et présentée de différentes manières par les navigateurs web et les technologies d'assistance. Par exemple, certaines personnes ne voient pas le contenu et comptent sur le bon codage des listes, des titres, des tableaux et d'autres structures de pages pour que les navigateurs et les techniques d'assistance puissent les identifier.

Certaines personnes ne voient que de petites parties du contenu à la fois ou perçoivent les couleurs et le design différemment. Certaines personnes utilisent des polices, des couleurs et un espacement personnalisés pour rendre le contenu plus lisible, ou parcourent le contenu à l'aide du clavier uniquement parce qu'elles ne peuvent pas voir le pointeur de la souris. Une conception accessible prend en charge différentes présentations du contenu web et différentes manières d'interaction.

Il est toutefois important de noter que l'accessibilité du web bénéficie également aux personnes *sans* handicap, comme par exemple :

- Les personnes utilisant un dispositif d'interaction ayant un petit écran tel qu'un téléphone mobile, une montre connectée, etc.
 - Les écrans de petites tailles entraînant des contraintes particulières, avec notamment une quantité d'information visible en même temps beaucoup plus faible [Jones et al. 1999]. Il est donc nécessaire de prévoir des interfaces qui restent accessibles, par exemple en réduisant les informations affichées, ou encore en prévoyant des tailles par défaut raisonnables pour le contenu et les contrôles. La Figure 4 montre un exemple de site web n'ayant pas prévu d'interface spécifique aux petits écrans et présentant donc, entre autres problèmes, une densité informationnelle trop importante ainsi que du texte parfois difficilement lisible du fait de la faible taille de police de caractère, comme c'est le cas pour les boutons situés à droite de l'interface.

Figure 4 : Un site web manquant d'accessibilité sur des petits écrans



- Les personnes seniors, dont les capacités ont décreu avec l'âge
 - Les limitations généralement acceptées qui surviennent souvent au cours du processus de vieillissement normal sont notamment : une baisse de l'acuité visuelle et auditive, une diminution des facultés motrices et un déclin cognitif [W3C – WAI-AGE ; Bamidis et al. 2014 ; Lord et al. 2015 ; Seals et al. 2015].
 - En France, la part des personnes âgées de 65 ans ou plus est passée de 13.9% en 1990 à 18.8% en 2016 [Observatoire des territoires 2017], et elle attendrait 27.2% en 2050 [INSEE 2017], ce qui augmentera d'autant le nombre d'utilisateurs qui pourraient bénéficier d'une interaction plus adaptée.
- Les personnes ayant un « handicap temporaire » et qui ont donc un besoin d'une compensation temporaire
 - Un utilisateur ayant oublié ses lunettes de vue.
 - Une personne s'étant cassé un bras.
- Les personnes ayant « une limitation situationnelle »
 - Une luminosité ambiante trop forte [Cohen et al. 2012] ou trop faible [Besharat et al. 2003 ; Ladouceur 2005] pouvant causer des problèmes de lisibilité de l'écran.

- Les personnes utilisant une connexion internet lente ou ayant une bande passante limitée ou onéreuse
 - Des pages web assez lourdes pouvant gêner l'utilisateur car ayant un temps de chargement trop long, dû à une connexion internet lente [WAI-AGE 2010]. Certains utilisateurs désactivent l'affichage des images ou vidéos afin de pallier ce problème, il est donc nécessaire que les informations importantes ne soient pas uniquement disponibles au travers de ces médias [Henry 2006].

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes focalisé sur une interaction web graphique, qui est un domaine de recherche à part entière. Nous ne prenons donc pas en compte les situations qui nécessiteraient des dispositifs d'interaction spécifiques ainsi que les modalités d'interaction vocales et tangibles, ce qui exclut notamment la prise en compte des troubles de la parole.

2.2 Différence entre accessibilité et utilisabilité

En considérant que l'accessibilité peut aussi bénéficier aux personnes sans handicap, mais ayant des déficiences et incapacités induites par la situation, il se pose la question de la différence entre accessibilité et utilisabilité. L'accessibilité et l'utilisabilité sont des aspects étroitement liés lors la création d'un site web ayant pour but d'être visité par tout le monde. Leurs objectifs, leurs approches et leurs recommandations se chevauchent de manière significative, et nous allons donc définir l'utilisabilité et détailler ce qui les distingue, selon le W3C [W3C – Accessibility, Usability, and Inclusion].

La norme [ISO 9241-11:2018] définit l'utilisabilité comme : « La mesure dans laquelle un produit peut être utilisé par des utilisateurs spécifiés pour atteindre des objectifs spécifiés de manière efficace, efficiente et avec satisfaction dans un contexte d'utilisation spécifié ».

Il nous semble à ce stade nécessaire de préciser un point : l'utilisabilité et l'accessibilité se réfèrent toutes deux à l'action d'utiliser : l'utilisabilité de façon évidente par la racine même du mot, et l'accessibilité par la définition donnée par le W3C (les IHM doivent être faites de façon que « les personnes atteintes de handicaps puissent les utiliser »). Les champs sémantiques des deux usages de ce verbe semblent cependant différents. Dans l'accessibilité, le W3C utilise ce terme dans le sens de « se servir de », sans aucune référence aux points clés mentionnés par la définition de l'utilisabilité : efficacité, efficience et satisfaction. L'apparente similitude entre les deux domaines peut donc être trompeuse et pourrait masquer des différences sous-jacentes.

Ainsi, la définition de l'utilisabilité est plus exigeante que celle de l'accessibilité fournie par le W3C : elle n'est atteinte que lorsque les produits sont à la fois « efficaces, efficaces et satisfaisants », là où l'accessibilité demande « seulement » à ce que les personnes handicapées elles-aussi puissent se servir des IHM. Mais l'utilisabilité est par ailleurs plus restreinte que l'accessibilité : elle s'applique à des « utilisateurs spécifiés » ayant des « objectifs spécifiés » et étant dans « un contexte d'utilisation spécifié », ce qui revient à dire qu'une interaction pourrait être considérée comme utilisable si le produit est prévu uniquement pour les loisirs à domicile d'une sous-catégorie de personnes, tout en ignorant les besoins d'autres sous-catégories. A l'inverse, comme nous l'avons vu, l'accessibilité prétend à une portée universelle : elle concerne

toutes les personnes utilisatrices, y compris celles atteintes de (a priori toutes les formes de) handicaps.

Une part de l'utilisabilité n'est donc pas prise en compte dans l'accessibilité (comme la satisfaction de l'utilisateur) mais l'inverse est vrai aussi (les handicaps ne sont pas obligatoirement traités dans l'utilisabilité, si ce n'est pas le public ciblé). L'utilisabilité pourrait ainsi correspondre à l'accessibilité lorsque 1) les « utilisateurs spécifiés » englobent des personnes souffrant de divers handicaps, et 2) le « contexte d'utilisation spécifié » inclut des considérations d'accessibilité telles que l'environnement et les technologies d'assistance. De plus, comme nous l'avons vu, les handicaps ne se définissent pas comme intrinsèques de l'utilisateur, mais peuvent aussi survenir en raison d'une situation particulière de ce dernier (froid, luminosité intense...). Il est donc cohérent que les préconisations de l'utilisabilité et de l'accessibilité se chevauchent partiellement. Toujours selon la norme ISO 9241, l'utilisabilité se base sur une conception centrée sur l'expérience de l'utilisateur. Cela peut inclure des aspects généraux qui ont un impact sur tout le monde et n'ont pas d'impact disproportionné sur les personnes handicapées. De nombreuses exigences d'accessibilité améliorent l'utilisabilité pour tout le monde, en particulier dans les situations limitantes. Par exemple, fournir un bon contraste entre texte et arrière-plan peut permettre d'aider une personne ayant une déficience visuelle (par ex. : une photosensibilité), mais cela profitera aussi aux personnes non-handicapées qui utilisent le web sur un appareil mobile en plein soleil ou dans une pièce sombre. Les légendes profitent aux personnes dans des environnements bruyants, mais aussi calmes. Certaines personnes ont des limitations fonctionnelles liées à l'âge et peuvent ne pas les identifier comme un « handicap ». L'accessibilité traite également de ces situations.

L'accessibilité répond :

- aux exigences techniques et liées au code sous-jacent au-delà de l'apparence visuelle. Par exemple, elles s'assurent que les sites web fonctionnent bien avec les technologies d'assistance. Cela inclut les lecteurs d'écran qui lisent le contenu à haute voix et les loupes d'écran qui agrandissent le contenu. Le logiciel de reconnaissance vocale utilisé pour saisir du texte est une autre forme de technologie d'assistance.
- Et aux exigences liées à l'interaction avec l'utilisateur et à la conception visuelle. Une conception inadéquate peut créer des obstacles importants pour les personnes handicapées. Par exemple, des instructions et des commentaires compréhensibles pour les formulaires et applications de sites web contribuent à une bonne utilisabilité. Ils aident également les personnes ayant des troubles cognitifs et d'apprentissage. Sans ces exigences, certaines personnes handicapées peuvent être exclues de l'utilisation du web à cause d'une problématique d'accessibilité, alors que les sites en question peuvent avoir une bonne utilisabilité.

Dans cette thèse, nous nous intéresserons à l'accessibilité du web. L'approche choisie est celle de l'adaptation dynamique des IHM, autrement dit de la proposition d'une IHM adaptée aux caractéristiques du contexte d'usage au moment de l'exécution par l'utilisateur. Il est donc nécessaire dans notre cas de nous focaliser sur une approche qui puisse être transcrite en règles implantables. L'accessibilité, telle qu'elle est définie par le W3C, offre un corpus de règles qui peut

majoritairement être transcrit en code. Les travaux sur l'utilisabilité offrent aussi des corpus de règles, comme les heuristiques de [Nielsen et al. 1990]. Mais la plupart du temps, ces recommandations sont difficiles à transcrire dans un moteur de règles : la première heuristique, pour ne citer qu'elle, est « simple and natural dialogue ». Autant une telle règle peut être aidante pour un concepteur humain, autant elle est complexe à rendre compréhensible et applicable pour un moteur d'adaptation. Les recommandations d'utilisabilité sont ainsi plus sujettes à interprétation et il faudrait montrer que leur transcription favorise bien l'utilisabilité recherchée avant de pouvoir les mettre en œuvre et étudier leurs combinaisons.

Par ailleurs, nous nous focaliserons dans cette thèse sur l'adaptation dynamique des sites web, les préconisations du W3C portant principalement sur ce domaine. La section suivante détaille ces préconisations.

2.3 Recommandations d'accessibilité du web

La notion d'accessibilité fait l'objet d'un travail important et ancien du W3C, qui a notamment lancé en 1997 le projet *Web Accessibility Initiative* (WAI). Ce projet a pour but d'améliorer l'accessibilité des utilisateurs en situation de handicap et d'une manière plus générale à tout utilisateur du web, et plusieurs travaux en ont découlé. Nous nous sommes principalement appuyé 1) sur les règles normatives du W3C, présentées dans les Règles pour l'accessibilité des contenus web (**Web Content Accessibility Guidelines - WCAG**) [W3C – WCAG 2018] qui contient des recommandations génériques sur l'accessibilité ; 2) sur les **Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes** (abrégé **EAPM** dans la suite du document) [W3C – EAPM 2016] qui décrivent les besoins des personnes malvoyantes pour que le contenu, les outils et les technologies électroniques leur soient accessibles ; et 3) sur les recommandations du projet européen **Web Accessibility Initiative: Ageing Education and Harmonisation (WAI-AGE)** [W3C – WAI-AGE 2010] qui ont pour but d'augmenter l'accessibilité du web pour les personnes âgées ainsi que pour les personnes en situation de handicap. Ces deux derniers documents sont des documents de travail du W3C.

Les deux derniers documents (EAPM et WAI-AGE) se focalisent sur certaines catégories d'utilisateurs, respectivement les personnes malvoyantes et les seniors ; alors que le premier a une visée générique/englobante.

2.3.1 WCAG 2.0 (2008) / WCAG 2.1 (2018)

Les WCAG, devenues un standard ISO en 2012 [ISO/IEC 40500:2012], présentent un large éventail de recommandations pour rendre les contenus web plus accessibles. Suivre ces règles permet de rendre les contenus accessibles à une plus grande variété de personnes en situation de handicap, incluant les personnes aveugles et malvoyantes, les personnes sourdes et malentendantes, les personnes ayant des troubles d'apprentissage, des limitations cognitives, des limitations motrices, des limitations de la parole, de la photosensibilité et les personnes ayant une combinaison de ces limitations fonctionnelles. Il ne répondra toutefois pas à tous les besoins des utilisateurs ayant un ou plusieurs de ces handicaps. Ces recommandations concernent l'accessibilité du contenu web sur les ordinateurs de bureau, les ordinateurs portables, les tablettes et les appareils mobiles. Le respect de ces recommandations rendra également le contenu web plus utilisable par les utilisateurs en général.

Les WCAG sont classées en 4 catégories principales, détaillant les 4 principes fondamentaux de l'accessibilité web, et dont voici un résumé des recommandations les composants :

1. Perceptible : L'information et les composants de l'interface utilisateur doivent être présentés à l'utilisateur de façon à ce qu'il puisse les percevoir. Cette catégorie recommande de
 - 1.1. Prévoir des équivalents textuels de tout contenu non textuel (qui pourra alors être présenté sous d'autres formes selon les besoins de l'utilisateur : grands caractères, braille, synthèse vocale, symboles ou langage simplifié),
 - 1.2. Proposer des alternatives aux media temporels (sous-titres, audio-description, scénario...),
 - 1.3. Créer du contenu pouvant être présenté de différentes manières sans perte d'information ou de structure,
 - 1.4. Faciliter la perception visuelle et/ou auditive du contenu par l'utilisateur.
2. Utilisable : Les composants de l'interface utilisateur et de navigation doivent être utilisables. Pour cela, il est recommandé de
 - 2.1. Rendre toutes les fonctionnalités accessibles au clavier, sans piège.
 - 2.2. Donner suffisamment de temps à l'utilisateur pour lire et utiliser le contenu, incluant la possibilité de mettre un média temporel en pause, d'éviter les timers ou interruptions, ...
 - 2.3. Ne pas présenter du contenu d'une manière étant connue pour pouvoir causer des crises (par exemple, une page Web doit être exempte de tout élément qui flashe plus de trois fois dans n'importe quel intervalle d'une seconde).
 - 2.4. Fournir à l'utilisateur des éléments d'orientation pour naviguer, trouver le contenu et se situer dans le site.
 - 2.5. Faciliter l'utilisation de fonctionnalités au travers de divers médium d'entrée, au-delà du clavier.
3. Compréhensible : Les informations et l'utilisation de l'interface utilisateur doivent être compréhensibles.
 - 3.1. Lisible : rendre le contenu textuel lisible et compréhensible.
 - 3.2. Prévisible : faire en sorte que les pages apparaissent et fonctionnent de manière prévisible.
 - 3.3. Assistance à la saisie : aider l'utilisateur à éviter et à corriger les erreurs de saisie.
4. Robuste : Le contenu doit être suffisamment robuste pour être interprété de manière fiable par une large variété d'agents utilisateurs, y compris les technologies d'assistance.

2.3.2 Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes (EAPM - 2016)

Les Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes (EAPM) précisent les besoins des personnes malvoyantes pour que le contenu, les outils et les technologies électroniques leurs soient accessibles. Il décrit les différentes déficiences visuelles et détaille les besoins spécifiques de ces utilisateurs.

Les différentes catégories de besoins utilisateurs auxquelles répondent ces exigences sont les suivantes :

- Luminosité et couleur :
 - Éviter les IHM trop lumineuses (par exemple en cas de photophobie, qui est une sensibilité douloureuse aux couleurs trop lumineuses).
 - Éviter de se baser uniquement sur la couleur pour transmettre une information.
 - Proposer différentes couleurs de fond d'écran et de texte afin de permettre à chaque utilisateur d'utiliser ce qui lui convient le mieux.
- Suivi : consiste à suivre des lignes de texte, y compris le passage de la fin d'une ligne au début de la ligne de texte suivante.
 - Faire en sorte de n'avoir toujours qu'un ascenseur de défilement maximum. Pour de nombreuses personnes, handicapées ou non, il est difficile de lire quand il est nécessaire de faire défiler de gauche à droite et inversement, pour chaque ligne de texte. Les utilisateurs malvoyants peuvent avoir l'habitude de zoomer sur une page, auquel cas il est nécessaire que les blocs de textes s'adaptent afin de ne pas entraîner un besoin de scroll horizontal.
 - Modification du flux de lecture afin de ne garder une lecture en une seule colonne.
 - Mise en place d'un nombre maximal de caractères par ligne afin d'éviter les lignes de texte trop longues.
 - Permettre à l'utilisateur de spécifier s'il souhaite ou non activer la césure de mots en fin de ligne.
- Perception : La perception comprend la capacité de reconnaître : 1) les lettres individuelles en fonction de leurs caractéristiques, c'est-à-dire la lisibilité, et 2) les informations non-textuelles et les éléments d'interface. Cette section comprend la taille du texte, la police, le style, la capitalisation et la taille de tous les éléments. L'espacement a également un impact sur la difficulté à percevoir les lettres.
- Espacements pour la lecture : L'espacement, tel que l'espace entre les lignes et l'espace entre les mots, a un impact sur la lisibilité. Cette section comprend l'interligne, l'espacement des lettres, l'espacement des mots, la justification, les marges et les bordures, et l'espacement entre les éléments.
- Identification des éléments : Certaines personnes modifient la façon dont certains éléments sont affichés pour faciliter la distinction des types de texte, tels que les en-têtes. Si tout le

texte est augmenté proportionnellement, les en-têtes peuvent devenir très grands et plus gros que ce dont les gens ont besoin pour lire le corps du texte. Certaines personnes préfèrent donc que les titres soient plus petits et utilisent des styles tels que la police, la couleur et le retrait pour distinguer les niveaux de titre.

- Point de regard et proximité : Le point de regard est la zone que l'utilisateur regarde. La proximité est l'espace entre les éléments. Dans l'interface utilisateur en général, la proximité consiste à utiliser l'espace pour regrouper le contenu lié et séparer le contenu non lié.
- Travailler avec les paramètres utilisateurs :
 - Les utilisateurs peuvent voir tous les éléments de l'interface qui leurs sont destinés, y compris lorsque les utilisateurs ont modifié les paramètres d'affichage tels que la taille du texte.
 - Les utilisateurs peuvent imprimer du contenu après avoir personnalisé la façon dont le texte est affiché.

Dans une grande partie de ces recommandations, il est demandé de donner à l'utilisateur la possibilité de modifier lui-même les différents réglages afin de lui permettre de choisir ce qui lui convient le plus.

2.3.3 WAI-AGE (2010)

Le projet WAI-AGE vise quant à lui à accroître l'accessibilité du web pour les personnes âgées et par extension pour les personnes handicapées. Il fournit une revue de la littérature sur le sujet, détaillant les différentes recommandations à respecter pour être accessible, et les liant avec celles du WCAG dès que possible.

Ces recommandations ont ainsi été divisées selon les 4 mêmes catégories principales que le WCAG, et dont voici un résumé (la liste complète étant disponible en Annexe 1 : Liste des recommandations du WAI-AGE) :

- Perceptible
 - Gestion du texte : taille minimale de 12-14pt, taille paramétrable par l'utilisateur, sans empatement, espacement entre lignes plus grand que l'espacement standard, justification à gauche, ...
 - Gestion des liens : bleus et soulignés par default, visuellement différents lorsqu'ils sont survolés par le curseur de la souris, changement de couleur après visite, taille de police des liens plus grande que le texte standard ; présentation sous forme de liste, ...
 - Gestion des couleurs : contraste suffisant entre texte et fond d'écran, texte sombre sur fond d'écran clair, pas de bleu ou de vert lorsqu'associé avec du noir, pas de couleurs fluorescentes, ...

- Organisation de la page : mettre des marges de chaque côté de la page, éviter le scrolling horizontal, fournir une alternative linéaire aux pages à l'aide de la disposition des tableaux, ...
- Gestion des médias : fournir un équivalent texte pour les images, utiliser du HTML plutôt que des images (ou autres médias) pour les informations textuelles, fournir des sous-titres ou une transcription pour les vidéos ou animations, ...
- Utilisable
 - Gestion des liens : fournir un vrai lien vers la page d'accueil, sur toutes les pages du site, fournir des liens clairs.
 - Organisation de la page : fournir des pages claires (éviter l'encombrement, éviter les éléments non pertinents pour le contenu principal), s'assurer que l'ordre de tabulation est logique, fournir un menu de navigation, un plan de site et un fil d'Ariane.
 - Catégorie « rien qui bouge » : éviter les textes qui bougent ou défilent, éviter les animations, éviter le contenu clignotant, utiliser des menus statiques (pas de menu déroulant), ne pas rafraîchir de pages automatiquement.
- Compréhensible
 - Gestion du texte : éviter le texte en capitales, Justifier le texte à gauche, utiliser des phrases et des paragraphes courts, utiliser des pages courtes, utiliser une voix active pour les textes, écrire clairement et avec les informations importantes au début.
 - Navigation : fournir une navigation cohérente, fournir des liens vers la page précédente / suivante (lorsqu'approprié), fournir une page « À propos de nous » et/ou « Contacts ».
 - Aide utilisateur : fournir de l'aide et/ou des FAQ pour le site, fournir des instructions pour remplir les formulaires, fournir des messages d'erreur clairs pour les formulaires, s'adapter aux fautes d'orthographe, aux tirets et aux variations courantes dans les formulaires.
 - Fonction recherche : s'assurer que la fonction de recherche tolère les fautes d'orthographe, s'assurer que la fonction de recherche est étiquetée, s'assurer que la requête de recherche est répétée sur la page des résultats de la recherche.
- Robuste
 - Utiliser un code valide, les pages doivent fonctionner sans prise en charge des scripts.
 - Ne pas demander de « double-clics », éviter de faire télécharger des documents par les utilisateurs (fournir des éléments au format HTML, le cas échéant).
 - Tenir compte de la vitesse de téléchargement des pages (créer de « petites » pages).

Ces travaux en matière d'accessibilité du web illustrent les règles qui sont à mettre en œuvre pour rendre un site accessible. Notre but par la suite n'est pas d'implémenter toutes ces règles mais de fournir un mécanisme permettant de le faire à des développeurs désireux d'améliorer l'accessibilité de leur site. Pour ce faire, nous porterons une attention particulière au passage à l'échelle de notre approche en couvrant un nombre significatif de règles. Nous nous limiterons toutefois à des adaptations de l'aspect graphique de l'interface, l'adaptation de modalités d'interaction étant un problème de recherche à part entière. Aussi par la suite, nous utiliserons un exemple fil rouge suffisamment large pour couvrir un panel représentatif (en nombre et en variété) de caractéristiques du contexte et de règles d'adaptation.

3 Exemple fil rouge

Cette partie a pour but de présenter de présenter un exemple concret et réaliste que nous réutiliserons pour illustrer notre travail, celui de Bernard. Nous allons tout d'abord présenter cet utilisateur en décrivant certaines de ces caractéristiques, et détailler différentes barrières à l'accessibilité qu'il pourrait rencontrer dans une situation donnée. Nous détaillerons ensuite des règles d'adaptation, écrites à partir des recommandations d'accessibilité, qui permettraient d'améliorer l'accessibilité de l'interface dans la situation de Bernard.

3.1 Le contexte d'usage

Bernard a 79 ans. De façon très classique à cet âge, sa vision est dégradée et il est atteint de cataracte. Cette affection induit une légère diminution de sa perception des couleurs et une légère photophobie (sensibilité douloureuse aux couleurs trop lumineuses). Il souffre aussi d'arthrose, entraînant des douleurs articulaires qui l'obligent à utiliser une canne pour marcher.

Cependant, Bernard reste actif et vient de partir en voyage à Lyon, où il souhaite résider dans un hôtel qu'on lui a recommandé, accessible facilement via le métro. Il ne connaît pas particulièrement bien la ville, mais sa fille lui a montré que l'hôtel propose une page web décrivant les moyens d'accès. Bernard souhaite donc consulter cette page une première fois en entrant dans le métro, pour être sûr de la ligne qu'il doit prendre et de l'arrêt auquel il doit s'arrêter, et une seconde fois à la sortie du métro afin de connaître les dernières instructions permettant de se rendre à l'hôtel.

3.2 Les barrières à l'accessibilité

Les différentes caractéristiques de Bernard décrites ci-dessus peuvent entraîner des barrières à l'accessibilité lors de sa consultation du site web de l'hôtel :

- Son **acuité visuelle amoindrie**, pouvant entraîner une difficulté à lire le texte présent sur le site ;
- La **détérioration de sa perception des couleurs**, pouvant entraîner des problématiques de lisibilité (contraste du texte, image...) ;
- Sa **photophobie**, pouvant le gêner si l'interface est trop claire, ou présente des contrastes trop importants ;

- **L'utilisation d'une canne** : Bernard est gêné par son besoin d'une canne lors de l'utilisation d'un dispositif (ex. smartphone) lorsqu'il est dans un contexte de mobilité. Il doit soit s'arrêter et rester debout, ce qui est pénible avec ses douleurs articulaires, soit subir une interaction dégradée du fait qu'il n'ait qu'une seule main disponible ;
- Ainsi que des **changements importants de luminosité ambiante**, pouvant donner une interface comparativement trop lumineuse d'un côté (quand Bernard est dans le métro), ou entraîner une difficulté à lire l'écran d'un autre côté (lorsque Bernard est en plein soleil).
- Son **âge**, principalement le fait qu'il soit considéré comme un senior, peut être utilisé comme un indicateur étant donné que de nombreuses personnes âgées ont des déficiences liées à l'âge qui peuvent affecter la façon dont elles utilisent le web (acuité visuelle, ouïe, capacités physique et cognitive), et qu'elles ont plus souvent un niveau plus faible concernant les nouvelles technologies.

3.3 Les règles d'adaptation pour le dépassement des barrières à l'accessibilité

Afin de compenser ces difficultés, nous souhaitons mettre en place différentes règles d'adaptation de l'IHM grâce aux recommandations présentées. Toutefois, une part importante des recommandations sont « fixes » (notamment celles du WCAG) afin de pouvoir être valables pour la majorité de la population. Par exemple, la recommandation EAPM 3.1.2 traitant du contraste entre le texte et son fond d'écran indique que « des combinaisons de couleurs lisibles et optimales diffèrent considérablement entre les individus et peuvent même varier pour un individu en fonction de conditions telles que la fatigue et l'éclairage », et certaines recommandations incluent un passage indiquant de donner à l'utilisateur la possibilité de modifier le paramètre en question (couleurs, taille de texte, contraste, ...) afin de pallier en partie ce problème. Toutes les recommandations ne sont donc pas directement transposables en règles d'adaptation.

Ci-dessous sont décrites les règles d'adaptation appliquées à la situation de Bernard.

Pour un utilisateur ayant un **acuité visuelle amoindrie** : la taille de la police de caractères est augmentée (WAI-AGE, référençant les WCAG 1.4.4 et 1.4.8 ; Exigences d'Accessibilité pour les personnes malvoyantes 3.3.1), les espacements entre lettres, entre mots et entre lignes sont augmentés (WAI-AGE, WCAG 1.4.8 et 1.4.12 ; Exigences d'Accessibilité pour les personnes malvoyantes 3.4.1, 3.4.2 et 3.4.3) ;

Pour un utilisateur **photosensible** : la luminosité du fond d'écran est assombrie et le niveau de contraste est réduit (Exigences d'Accessibilité pour les personnes malvoyantes 3.1.2) ;

Pour une **luminosité ambiante forte** (plein soleil) : la luminosité du fond d'écran est éclaircie et le niveau de contraste est augmenté (EAPM 3.1.2 ; WAI-AGE) ;

Pour une **luminosité ambiante très faible** (dans le métro) : la luminosité du fond d'écran est assombrie (EAPM 3.1.2) ;

Pour un utilisateur **senior** :

- Augmenter la taille de la police de caractères augmentée (WAI-AGE, WCAG 1.4.4 et 1.4.8, Exigences d'Accessibilité pour les personnes malvoyantes 3.3.1)
- Augmenter les espacements entre lettres, entre mots et entre lignes (WAI-AGE, WCAG 1.4.8 et 1.4.12 ; Exigences d'Accessibilité pour les personnes malvoyantes 3.4.1, 3.4.2 et 3.4.3)
- Augmenter la taille de police de caractères des liens (WAI-AGE, WCAG 1.4.4)
- Augmenter le contraste entre texte et fond d'écran grâce à l'éclaircissement du fond d'écran (vers une couleur pastel afin d'éviter des problèmes de photosensibilité) (WAI-AGE, WCAG 1.4.1, 1.4.3 et 1.4.6)
- Raccourcir les phrases, paragraphes et pages (lorsque le texte le permet) (WAI-AGE, WCAG 3.1.5)
- Fournir des pages claires, ordonnées et éviter les éléments non-pertinents au contenu principal, tels que des éléments purement esthétiques (WAI-AGE ; WCAG 2.4)
- Éviter les animations, ainsi que les contenus clignotant (WAI-AGE ; WCAG 2.2.2)
- Lorsqu'ils sont nombreux, les liens sont présentés sous forme de liste numérotée (WAI-AGE ; WCAG 1.4.8)

Certaines règles pour les seniors se retrouvent parmi les règles appliquées pour d'autres caractéristiques (par exemple pour une acuité visuelle amoindrie). L'âge est ainsi utilisé comme caractéristique et comme indicateur pour d'autres caractéristiques, telle qu'une baisse de l'acuité visuelle.

4 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a introduit le cadre de cette thèse. Il définit notamment les deux notions importantes que sont le handicap et l'accessibilité. Nous avons notamment retenu la définition de l'OMS, pour laquelle le handicap sert de terme générique pour désigner les déficiences, les limitations d'activités ou les restrictions de participation d'une personne ; ainsi que celle de [Sears et al. 2003] qui utilise cette définition afin de définir les « déficiences et incapacités induites par la situation ». Nous considérons ainsi que le handicap doit être vu non pas simplement comme une déficience ou autre limitation de la personne, mais comme l'existence d'une barrière pour l'utilisateur, qu'elle soit due à un handicap, physique (ex : faible acuité visuelle) ou mental (ex : dyslexie), à l'environnement (ex : trop lumineux), ou encore à l'activité (ex : tâche complexe, ou utilisation d'un smartphone en marchant). La prise en compte de ces situations de handicap dans le cadre d'Internet relève de la notion d'accessibilité, sur laquelle s'est notamment penché le W3C. Le W3C définit ainsi l'accessibilité du web comme le fait que « les sites web, les outils et les technologies sont conçus et développés de façon à ce que les personnes atteintes de handicaps puissent les utiliser ». Ce travail de thèse se focalise plus spécifiquement sur l'accessibilité du web au travers d'une adaptation de l'interface graphique.

Ce chapitre se penchait ensuite sur l'étude de différents recueils de recommandations d'accessibilité, et présentait comment ces recommandations peuvent être utilisées pour définir des règles d'adaptation de sites web pour l'amélioration de leur accessibilité.

Enfin, nous avons décrit un exemple fil rouge qui sera utilisé tout au long du manuscrit. Cet exemple est utilisé afin d'illustrer différentes barrières à l'accessibilité résultantes de handicaps, que ces derniers soient propres à une personne ou induits par sa situation, et comment la mise en œuvre d'adaptations des IHM permet de proposer une interface plus accessible.

Chapitre II

Etat de l'Art

II. Etat de l'Art

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que le handicap peut être considéré comme étant relatif à une situation. Dans ce cas, l'accessibilité est le résultat d'une adaptation de l'interface face à des déficiences ou des incapacités induites par la situation. Dans un premier temps, l'état de l'art va donc s'intéresser à l'amélioration de l'accessibilité. Au-delà de l'accessibilité, de nombreux travaux ont abordé la question de l'adaptation en interaction homme-machine, et constituent le deuxième axe de l'état de l'art. Enfin, nous présentons des travaux d'adaptation basés sur la logique floue.

Nous analysons les travaux au regard de la prise en compte de quatre dimensions correspondant aux verrous présentés en introduction :

1. La multiplicité des caractéristiques du contexte d'usage. Pour cela, nous nous appuyons sur la définition de [Dey 2001] : « toute information pouvant être utilisée pour caractériser la situation d'une entité. Une entité étant une personne, un endroit, ou un objet considéré comme pertinent pour l'interaction entre un utilisateur et une application, y compris l'utilisateur et les applications elles-mêmes ». Plus précisément nous étudions son étendue au regard du triplet <utilisateur, plate-forme, environnement> [Calvary et al. 2003], et en particulier l'aspect utilisateur, qui est central pour l'accessibilité et qui comporte, à lui seul, une multitude de caractéristiques. Par exemple, le cluster Virtual User Modelling and Simulation [VUMS 2013] a identifié plus de 250 caractéristiques utiles permettant de simuler un utilisateur humain, en ne focalisant que sur les caractéristiques physiques de l'humain ;
2. L'imprécision des valeurs attribuées à ces caractéristiques de contexte, que cette évaluation soit faite par capture (on peut par exemple inférer l'âge de l'utilisateur à partir d'une image prise par sa caméra, mais la précision est inférieure à 50% [Jung et al. 2018]) ou par déclaration (on peut demander à l'utilisateur de déclarer son acuité visuelle, mais l'incertitude sur la valeur collectée est ici aussi élevée [Jasberg et al. 2018]) ;
3. La combinaison des règles d'adaptation : prendre en compte les multiples caractéristiques du contexte d'usage nécessite, sous une forme ou une autre (transformations de modèles, patrons de solutions, règles logiques, etc.), de définir de multiples règles d'adaptation, puis de les combiner pour obtenir une solution en résolvant à la fois le compromis entre les différentes règles et la gestion performante de cette combinatoire [Yang et al. 2007].
4. Le niveau de complexité des règles d'adaptation, qui, associées à de multiples caractéristiques du contexte d'usage, peuvent devenir problématiques à concevoir et à maintenir, comme nous l'avons vu dans l'introduction. De plus, une trop grande complexité de règles peut entraîner des problèmes liés à leurs combinatoires. La notation sera donc inverse à la complexité : une évaluation élevée de la complexité signifie que les règles restent simples alors qu'une évaluation faible de la complexité correspond à des règles complexes.

Enfin certains travaux de cet état de l'art peuvent être considérés comme relevant des deux catégories « Accessibilité » et « Adaptation des IHM ». Pour faciliter la lecture, ils sont présentés dans la catégorie qui nous semble la plus pertinente. Dans les sous-sections qui suivent, les travaux sont décrits selon l'ordre temporel de leur parution, et sont suivis d'une section synthétisant tous les travaux, indépendamment de leur catégorie.

1 Travaux centrés sur l'accessibilité

Comme cela a été détaillé dans le chapitre précédent, la notion d'accessibilité fait l'objet d'un travail de normalisation du World Wide Web Consortium (W3C) depuis la fin des années 1990. Des recommandations d'accessibilité ont ainsi été créées pour tout public, telles que les recommandations génériques disponibles dans les *Règles pour l'accessibilité des contenus Web*, (ou Web Content Accessibility Guidelines – WCAG – en anglais) [W3C – WCAG 2018], mais aussi pour certains publics plus spécifiques, tels que les personnes malvoyantes, avec les *Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes* [W3C – EAPM 2016], ou encore les personnes âgées avec le projet WAI-AGE du W3C (Web Accessibility Initiative: Ageing Education and Harmonisation) [W3C – WAI-AGE 2010].

Toutefois, l'accessibilité reste un domaine à explorer étant donné que ces recommandations restent parcellaires du fait de la multiplicité des situations à prendre en compte [Schmutz et al. 2017], mais aussi car la majorité des recommandations ont été créées dans le but d'être valables directement pour une majorité de la population, alors que nous souhaitons en tirer des règles d'adaptation des IHM, permettant de mettre en place différentes adaptations pour différents publics. Par exemple, la recommandation 3.3.1 des Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes traitant de la taille de police indique que « les utilisateurs doivent pouvoir modifier la taille de police de tout le texte, sans zoomer sur toute l'interface », en expliquant que « certaines personnes ont besoin d'un texte plus grand pour percevoir les lettres. Bien que l'augmentation de la taille soit la solution la plus courante, certaines personnes ayant une vision tunnelisée ou une bonne acuité visuelle peuvent préférer des lettres plus petites pour pouvoir voir plus de mots à la fois ». Cette recommandation n'est pas directement transposable en règle d'adaptation automatique étant donné qu'elle ne précise pas de façon déterministe les différents cas à mettre en place : les utilisateurs peuvent préférer un rendu à un autre et la règle prévoit explicitement une action de leur part pour obtenir ce rendu.

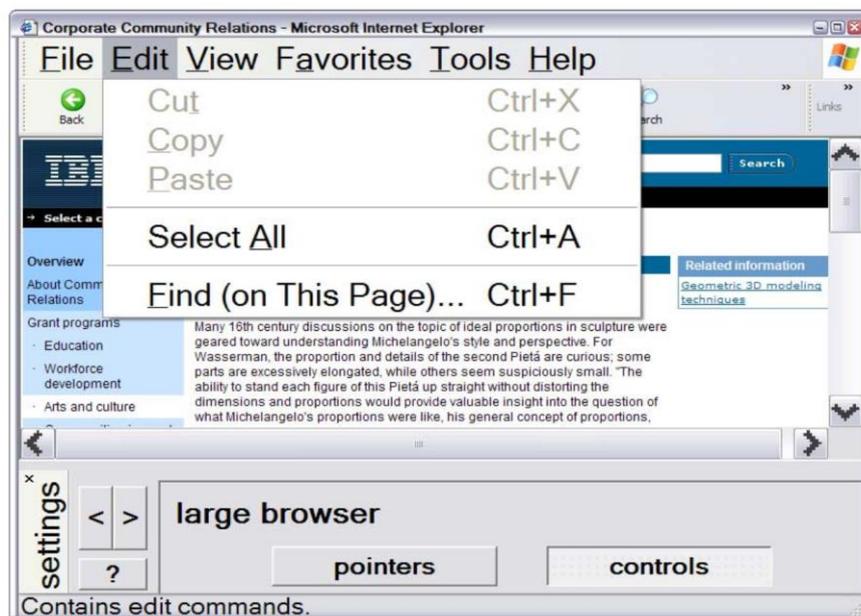
Nous présentons ci-dessous les travaux que nous estimons représentatifs des différentes orientations pour l'amélioration de l'accessibilité à destination des personnes atteintes de troubles divers, par le biais de règles d'adaptation. Cette section est subdivisée en deux parties, une première détaillant des travaux sur les IHM adaptables, et une deuxième traitant de travaux sur les IHM adaptatives. Comme nous l'avons vu en introduction, un système adaptable « est personnalisable sur intervention explicite de l'utilisateur qui peut agir sur les paramètres fixés par le concepteur » ; un système adaptatif « est doué de discrimination. Il sait reconnaître la situation (parmi plusieurs déclencheurs fixés par le concepteur) et adopte la réaction (recommandation) fixée elle aussi par le concepteur pour cette situation. Mais le système est incapable d'évaluer l'effet de sa réaction » [Thevenin et al. 2003].

1.1 Accessibilité pour des sites web adaptables

De nombreux travaux se sont intéressés à l'accessibilité des sites web en permettant à l'utilisateur de définir ses préférences [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017]. L'un des exemples qui nous semble pertinent est [Richards et al. 2004]. Ce travail présente un mécanisme d'adaptation dynamique des pages Web prenant en compte plusieurs aspects de l'accessibilité. Cette approche se focalisait initialement sur l'amélioration de l'accessibilité pour les personnes âgées, avant d'être étendue à différents handicaps, suite au constat que les limitations liées à l'âge peuvent aussi se retrouver dans le reste de la population, au travers de divers handicaps (acuité visuelle limitée, perception des couleurs dégradée, arthrite, problème d'attention, ...).

Ce mécanisme d'adaptation permettant de proposer des interfaces adaptables se présente sous la forme d'un plug-in permettant aux utilisateurs finaux de choisir les adaptations à appliquer dynamiquement aux pages web visitées, à la taille du curseur et à la barre d'outils du navigateur (Figure 5). Il s'appuie sur 13 possibilités de changement, telles que la taille de police, l'espacement entre les caractères, la modalité vocale, la suppression du multicolonnage, ou encore le masquage des images, des fonds et des animations... Un utilisateur peut ainsi essayer différentes adaptations et conserver celles qui lui correspondent le mieux. Une personne ayant une acuité visuelle réduite peut ainsi choisir d'augmenter la taille du texte, les espacements entre lettres ou entre lignes, d'agrandir le pointeur ou les contrôles du navigateur, ou encore de passer à une modalité vocale.

Figure 5 : Exemple d'adaptation, selon [Richards et al. 2004], avec la mise en place d'un « navigateur large »



Il y a donc peu de règles et peu d'indications sur leur niveau de complexité. La combinaison de règles est envisagée (« Les utilisateurs polyhandicapés doivent pouvoir appliquer des transformations en les combinant. » [Richards et al. 2004]), sans plus de précision.

Le contexte d'usage est réduit à quelques caractéristiques de l'utilisateur (âge, degré de handicap visuel, limitation cognitive, difficultés motrices des mains, manque d'expérience avec l'informatique), sans qu'il soit question de leur validité ou de leur incertitude.

[Kurniawan et al. 2006] présentent comment traiter certains handicaps (visuels, moteurs, cognitifs et auditifs) liés à l'âge, au niveau de la conception des site web ou grâce à différentes possibilités de personnalisation, telles que les fonctionnalités d'accessibilité standards des navigateurs, les serveurs proxy, les technologies d'assistance ou les navigateurs spécialement conçus pour l'accessibilité. Les handicaps sont déclinés en 21 caractéristiques, ayant toutes leurs correspondances en termes d'adaptation. Ainsi, dans la catégorie des handicaps visuels liés à l'âge, une baisse de l'acuité visuelle implique une taille minimale pour le texte ou les boutons ; une baisse de la capacité à reconnaître des figures imbriquées implique d'éviter les fonds d'écran à motifs répétitifs ; ou encore une baisse de l'élasticité du cristallin (presbytie) implique d'éviter les textes tout en capitales ou en gras, d'éviter un trop grand nombre de polices de caractères ou les couleurs trop lumineuses. Dans la catégorie des handicaps moteurs, les auteurs citent par exemple l'arthrite, qui complique certaines actions telles que les clics ou le défilement de page web via la molette ou un glissé-déposé via l'ascenseur et va impliquer un agrandissement des liens hypertextes et des boutons, ou encore un découpage des plus grandes pages en plusieurs petites.

L'article présente deux expérimentations où les participants, des personnes âgées, devaient personnaliser eux-mêmes leurs pages web, au travers de divers outils et techniques, tels que (a) AccessGateway (un serveur proxy permettant aux utilisateurs de personnaliser la présentation des pages web) ; (b) un outil comprenant un lecteur d'écran, une loupe d'écran, et d'autres fonctionnalités permettant d'inverser les couleurs ; (c) le remplacement du CSS original par un CSS fourni par le W3C comme un exemple d'application des recommandations ; et dernièrement (d) le remplacement du CSS original par un CSS généré par les participants via l'application « Focus on CSS ».

Dans ce travail, les auteurs proposent d'utiliser 21 caractéristiques, ce qui est une quantité intermédiaire, bien que seul l'aspect utilisateur du contexte d'usage soit pris en compte, sans gestion de l'environnement ou de la plateforme.

[Ghiani et al. 2017] a pour but de fournir aux utilisateurs finaux un système adaptable, leur permettant de définir les règles à appliquer afin de leur permettre de personnaliser, facilement et de manière autonome, le comportement et la présentation de leurs applications pour l'Internet des Objets. Ils proposent un environnement permettant aux utilisateurs de spécifier facilement ces règles sous la forme de couple événement/action en limitant les conditions aux éléments de contexte effectivement utilisables dans la situation de l'utilisateur.

L'architecture de cet environnement est présentée en Figure 6. En premier lieu, un modèle de contexte spécifique au domaine considéré est affiné grâce à des experts dudit domaine (flèche n°1 dans la figure) car cela nécessite de connaître les caractéristiques de ce domaine d'application (quels aspects contextuels à prendre en compte et leur niveau de détail). Ce modèle de contexte est ensuite enregistré dans le gestionnaire de contexte, qui construit ses structures de données en conséquence. Le résultat de cette phase est une description des classes contextuelles et des attributs qui peuvent être exploités pour définir des déclencheurs de règles dans l'outil de

création. Ensuite, l'outil de création peut également être personnalisé : il charge le modèle de contexte spécifique au domaine (2a) afin de présenter la structure des éléments contextuels à prendre en compte lors de la modification des déclencheurs. De même, les actions possibles sont configurées à partir d'une classification générique, puis personnalisées pour l'application spécifique considérée (2b). À ce stade, l'environnement de création est configuré de manière à permettre aux utilisateurs finaux d'éditer et d'enregistrer les règles en définissant des déclencheurs en termes d'événements/conditions liés aux attributs et actions contextuels pertinents.

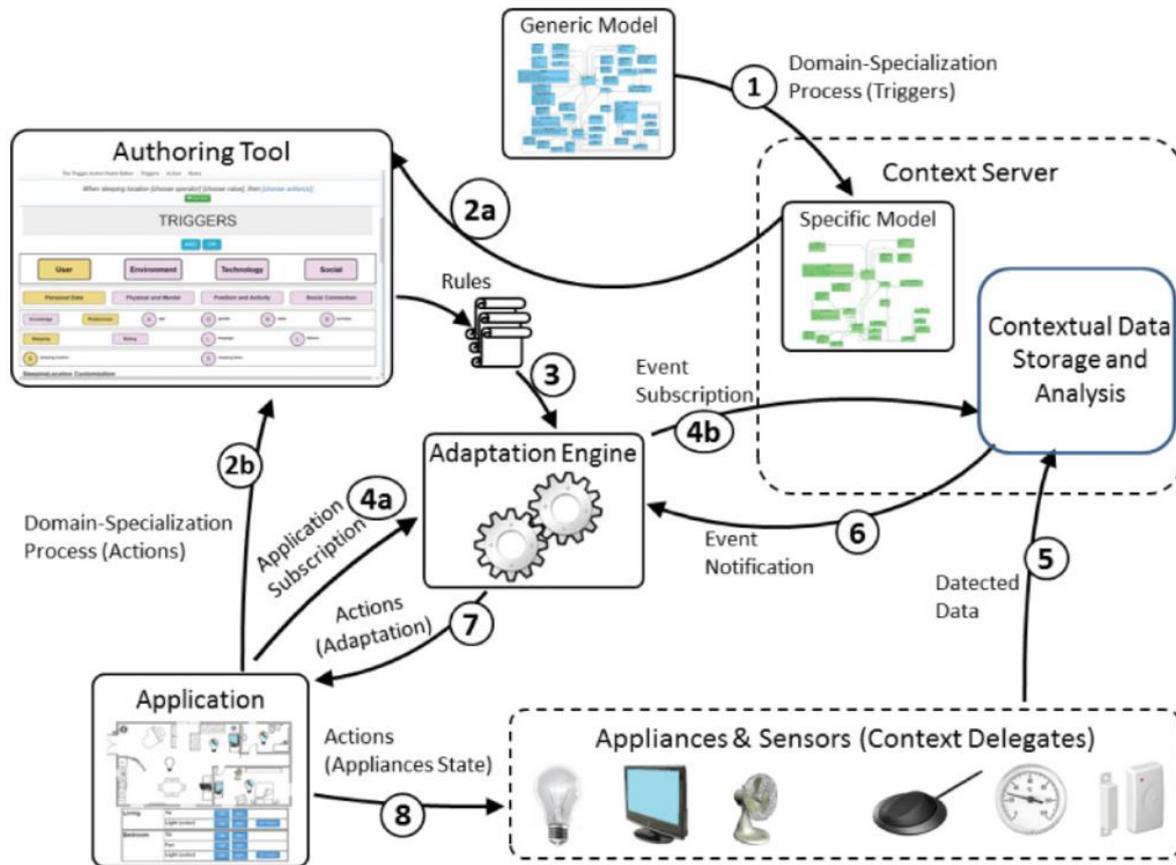
Les règles enregistrées sont spécifiées en JSON et envoyées au moteur d'adaptation (3). Ensuite, lorsque l'application est exécutée, elle s'abonne au moteur d'adaptation (4a), qui à son tour s'abonne au gestionnaire de contexte pour les événements/conditions associés aux règles de cette application (4b). Des capteurs ou des services externes mettent à jour en permanence le Serveur de Contexte en fournissant des données réelles (5). Pour chaque événement et condition précédemment enregistrés se produisant dans le contexte actuel, le gestionnaire de contexte notifie le moteur d'adaptation (6), qui extrait la liste des actions des règles vérifiées (c'est-à-dire les règles ayant la partie « déclencheur » vérifiée) et les envoie vers l'application (7) et enfin aux appareils concernés, si nécessaire (8).

Le modèle de contexte est constitué de quatre dimensions principales : utilisateur, environnement, technologie et relations sociales. En particulier, le modèle utilisateur, qui nous intéresse le plus dans le cadre de cette thèse, inclut quatre groupes de données : (1) des données personnelles, comprenant des données statiques (nom, âge, genre, connaissances/éducation) ainsi que les préférences (langue, loisir, sommeil et repas). (2) L'état physique et mental de l'utilisateur comprend des données associées à des handicaps (tels que la cécité, la surdité ou un handicap moteur), à des maladies (tels que l'hypertension et le diabète), aux émotions (anxiété, ennui, joie, ...) à des aspects cognitifs (attention, méditation, ...), et à des données physiologiques (pouls, pression sanguine, ...). (3) La position et l'activité, où la position peut être exprimée en termes absolus mais aussi relatifs, en précisant un type de proximité (en face de, à côté, sous, ...) et de point d'intérêt (appareil, objet, environnement, ...) et où l'activité est subdivisée en termes de comportement (debout, assis, couché, en mouvement, ...) et de but (physique, interactif ou encore cognitif). Enfin (4) les relations sociales permettent de préciser le nom d'un contact et la ou les relations entretenues avec celle-ci.

Les auteurs présentent un certain nombre de règles, et mentionnent que les actions possibles comprennent notamment la modification de l'IHM (permettant de changer la présentation, le contenu ou la navigation de l'interface utilisateur de l'application personnalisée) ou la distribution de l'IHM entre différentes plateformes, sans toutefois détailler plus précisément ces possibilités. Ils donnent des exemples d'action sur le monde extérieur, des règles les plus simples (« A minuit, fermer les volets ») aux plus élaborées (« Quand je ne suis pas à la maison et que je suis en vacances, allumer à intervalles réguliers certaines lumières afin de simuler une présence à la maison »). Un utilisateur peut combiner des événements à l'aide des opérateurs binaires ET, OU et NON, et un système de résolution de conflits entre règles est géré grâce à un système de poids pour chaque règle.

Les caractéristiques utilisateurs pouvant être prises en compte semblent relativement nombreuses, mais définies par l'utilisateur lui-même, sans mention d'une gestion de l'incertitude des valeurs.

Figure 6 : L'architecture de l'environnement proposé par [Ghiani et al. 2017]



Ces travaux [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017] portant sur des IHM adaptables, les utilisateurs sont donc logiquement chargés de créer eux-mêmes une interface qui leur est adaptée. La combinatoire des règles n'est donc pas vraiment traitée étant donné que c'est aux utilisateurs de faire le choix des adaptations en fonction du rendu final. Toutefois, les utilisateurs ayant des problèmes d'accessibilité, qu'ils soient par exemple dus à un handicap ou à de faibles connaissances en informatique, peuvent avoir du mal à utiliser ces outils sur une interface initiale non adaptée (par exemple à cause d'une police de caractère par défaut trop petite pour eux et donc difficilement lisible). Il est aussi nécessaire pour les utilisateurs de tester différentes adaptations avant de trouver celles qui leur conviennent le mieux. Pour ces raisons, l'utilisation d'un système adaptatif (pouvant être couplé à un système adaptable) nous semble préférable. Enfin, l'incertitude des valeurs n'est pas évoquée, au même titre que la gestion des règles potentiellement complexes.

1.2 Accessibilité pour des sites web adaptatifs

L'accessibilité peut aussi donner lieu à des adaptations automatiques du système en se basant sur des règles, c'est-à-dire à de l'adaptabilité.

[Yang et al. 2007] proposent un système basé sur des règles d'adaptation pour prendre en compte le contexte de l'utilisateur et ses besoins afin d'améliorer l'accessibilité de l'IHM. Les auteurs divisent le contexte en 4 parties comprenant les besoins d'accessibilité de l'utilisateur (selon qu'il est aveugle, malvoyant, sourd ou malentendant), la situation de l'utilisateur (au bureau, en réunion, en train de conduire), le réseau (internet filaire ou sans-fil), et la plateforme (notebook, assistant personnel ou téléphone).

Le contexte d'usage couvre donc les trois dimensions (utilisateur, plate-forme, environnement), mais de façon très partielle, ne comprenant qu'un nombre limité de caractéristiques. L'adaptation reste relativement sommaire : les exemples fournis proposent d'améliorer l'accessibilité des utilisateurs en fonction de leurs handicaps, en coupant ou augmentant le volume sonore (selon le niveau d'audition de l'utilisateur, malentendant ou sourd, ou encore sa situation tel que « en réunion »), augmentant la taille de police ou encore en affichant ou supprimant les images (selon que l'utilisateur soit malvoyant ou aveugle), et adaptant la qualité audio/vidéo à la performance du réseau et à la taille de l'écran. Les règles sont donc simples et ne nécessitent pas de gestion de leur combinaison. L'incertitude des valeurs n'est pas évoquée.

[Kolekar et al. 2018] proposent une approche pour fournir des IHM adaptatives dans le domaine de l'apprentissage, en prenant en compte le style d'apprentissage de l'utilisateur. Les utilisateurs sont catégorisés selon 8 styles d'apprentissage (actif, réflexif, visuel, verbal...), qui induisent des choix différents dans les media et les contenus à proposer. Ainsi, un apprenant considéré comme « visuel » se verra proposer des supports graphiques (images, graphes, vidéos), tandis qu'un apprenant « verbal » disposera plutôt de textes, mêlés et annonces. Dans cette approche, le seul élément du contexte d'usage est le style d'apprentissage. Les règles ne peuvent pas être complexes et ne peuvent être combinées puisque les différents styles sont mutuellement exclusifs. L'incertitude et la complexité ne sont pas mentionnés.

Ces premiers travaux [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017 ; Yang et al. 2007 ; Kolekar et al. 2018] cherchaient explicitement et principalement à améliorer l'accessibilité des interfaces, que ce soit en fonction du choix des utilisateurs par le biais d'un système adaptable [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017], ou de manière automatique via un système adaptatif [Yang et al. 2007 ; Kolekar et al. 2018]. Ces travaux permettent de mettre en avant différentes règles d'adaptation. Toutefois, les recommandations du W3C sont généralement fixes et ne se prêtent pas forcément à une traduction en règles d'adaptation dynamiques.

Dans la section suivante, les travaux cités portent sur les IHM adaptatives avec des objectifs plus étendus, où l'accessibilité n'est que l'un des paramètres à prendre en compte. Ces travaux nous intéressent car d'une part l'automatisation peut amener à considérer l'incertitude des valeurs et d'autre part parce que la prise en compte d'autres facteurs que l'accessibilité pourrait les amener à considérer la combinatoire des adaptations.

2 Approches d'adaptation des IHM

L'adaptation des interfaces à leur contexte d'usage a été étudiée suivant différentes approches. La plus étudiée dans la littérature suit une approche basée sur les modèles [Lehmann et al. 2010 ; Rieger et al. 2020], avec notamment le cadre de référence Cameleon [Thevenin et al. 2003], divers

travaux se basant sur celui-ci [Paternò et al. 2009 ; Akiki 2014 ; Miñón et al. 2016 ; Limbourg et al. 2004 ; Sottet et al. 2006 ; Aquino et al. 2009], ainsi que d'autres travaux basés sur les modèles mais non apparentés à Cameleon [Fink et al. 1996 ; Gajos et al. 2010 ; Yigitbas et al. 2020]. D'autres approches existent, telles que des approches basées sur les patrons de conception [Peissner et al. 2012] ou encore le machine learning [Genaro Motti et al. 2012] que nous décrivons dans un second temps.

2.1 Cadre de référence Cameleon et travaux associés

2.1.1 Cadre de référence Caméléon

Un travail de référence en adaptation des interfaces basée sur les modèles est le cadre Cameleon [Thevenin et al. 2003]. Il vise la génération dynamique d'IHM adaptées à leur contexte d'usage. Comme le montre la Figure 7, le framework se décompose en trois parties : modèles, phase de conception et phase d'exécution.

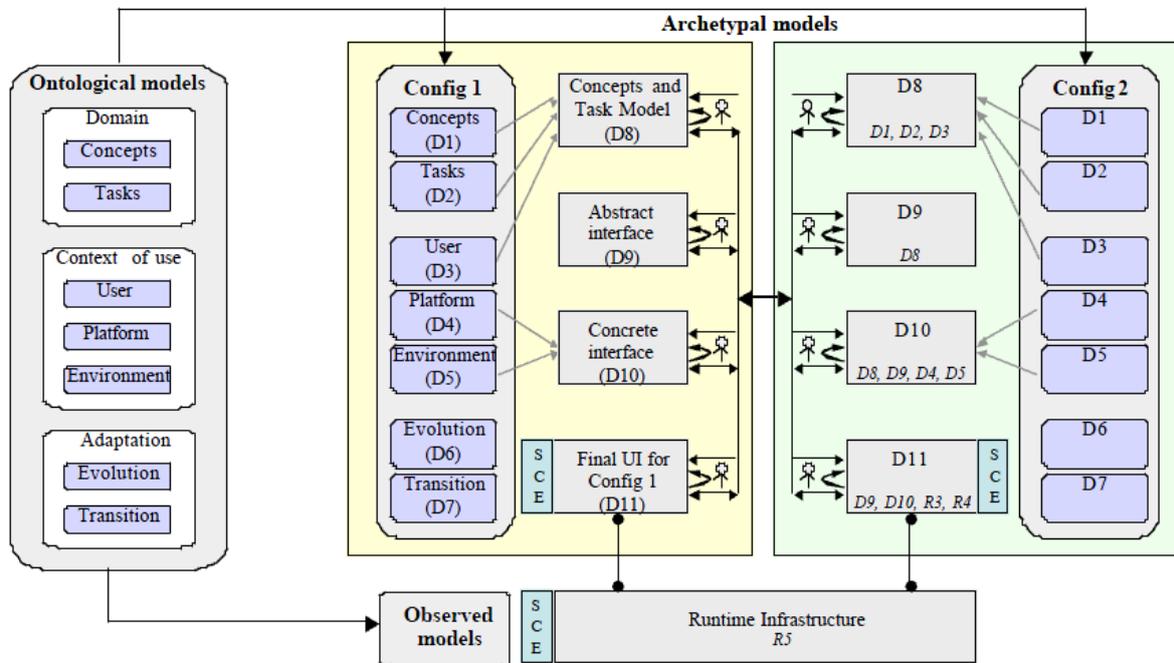
Les modèles ontologiques (à gauche de la figure) sont des modèles abstraits des concepts (et de leurs relations) impliqués dans le principe d'adaptation. Ils comprennent : 1) le modèle de domaine, décrivant les entités manipulées dans les environnements informatiques, ainsi que les tâches utilisateurs ; 2) le contexte d'usage, comprenant les modèles utilisateurs, de plateforme et d'environnement et 3) l'adaptation, incluant les modèles d'évolution et d'adaptation de l'IHM. Ces modèles ontologiques sont instanciés en modèles archétypaux et/ou observés. Les modèles archétypaux sont des modèles déclaratifs qui servent de base à la conception d'un système interactif particulier, en représentant un contexte d'usage type, c'est-à-dire qu'ils permettent de déclarer les caractéristiques de la personne-type censée utiliser le système (âge, taille, capacités, ...), les caractéristiques de la ou des plateformes qui seraient utilisables (puissance de calcul, taille d'écran, ...) et dans quel environnement (luminosité, localisation GPS, température, ...). Les modèles observés sont quant à eux alimentés par les données captées à l'exécution, telles que la luminosité ambiante.

La phase de conception (partie droite de la figure) est conforme à un processus de développement structuré dont le résultat final est un ensemble d'interfaces utilisateur exécutables ciblées sur un contexte archétypal particulier d'utilisation. Plus précisément, cette approche s'appuie sur un processus de réification en 4 niveaux d'abstraction :

1. Le Modèle de tâches et de concepts : au plus haut niveau, ce modèle rassemble les descriptions des tâches et des concepts produites par le concepteur pour le système en question ;
2. L'IHM abstraite (AUI) représente la structure de l'IHM en termes d'espaces de travail, ainsi que la navigation entre ces espaces, tout en restant indépendant de toute plateforme.
3. L'IHM concrète (CUI) représente l'IHM en termes d'interacteurs (boutons, liens, menus, ...), pour une plateforme donnée.
4. L'IHM finale (FUI), générée à partir de l'IHM concrète, est le code source de l'IHM, exécutable.

Pour la phase d'exécution (en bas de la figure, numérotée R5), une infrastructure permet de capturer le contexte en cours, et d'afficher l'IHM finale correspondant le mieux à ce contexte. Dans une optique d'adaptation à la volée, l'IHM finale devrait être calculée dynamiquement à cet instant.

Figure 7 : Cameleon Reference Framework



2.1.2 Travaux significatifs basés sur Caméléon

Cameleon utilise un modèle de tâches, trois niveaux d'abstraction (IHM abstraite, IHM concrète et IHM finale), un modèle de contexte et des règles d'adaptation. Nous n'avons pas trouvé d'approche implémentant la totalité des possibilités suggérées par Cameleon (toutes les couches et relations). La plupart se base sur les niveaux de modélisation définis : tâches, AUI, CUI et FUI. D'autres travaux utilisent des modèles en support à l'adaptation sans mentionner le cadre Cameleon. A titre d'exemple de travaux s'appuyant sur le cadre de référence Cameleon, on peut notamment citer MARIA [Paternò et al. 2009], Cedar [Akiki 2014], et le « Adaptation Integration System » de [Miñón et al. 2016], tout trois présentés ci-dessous.

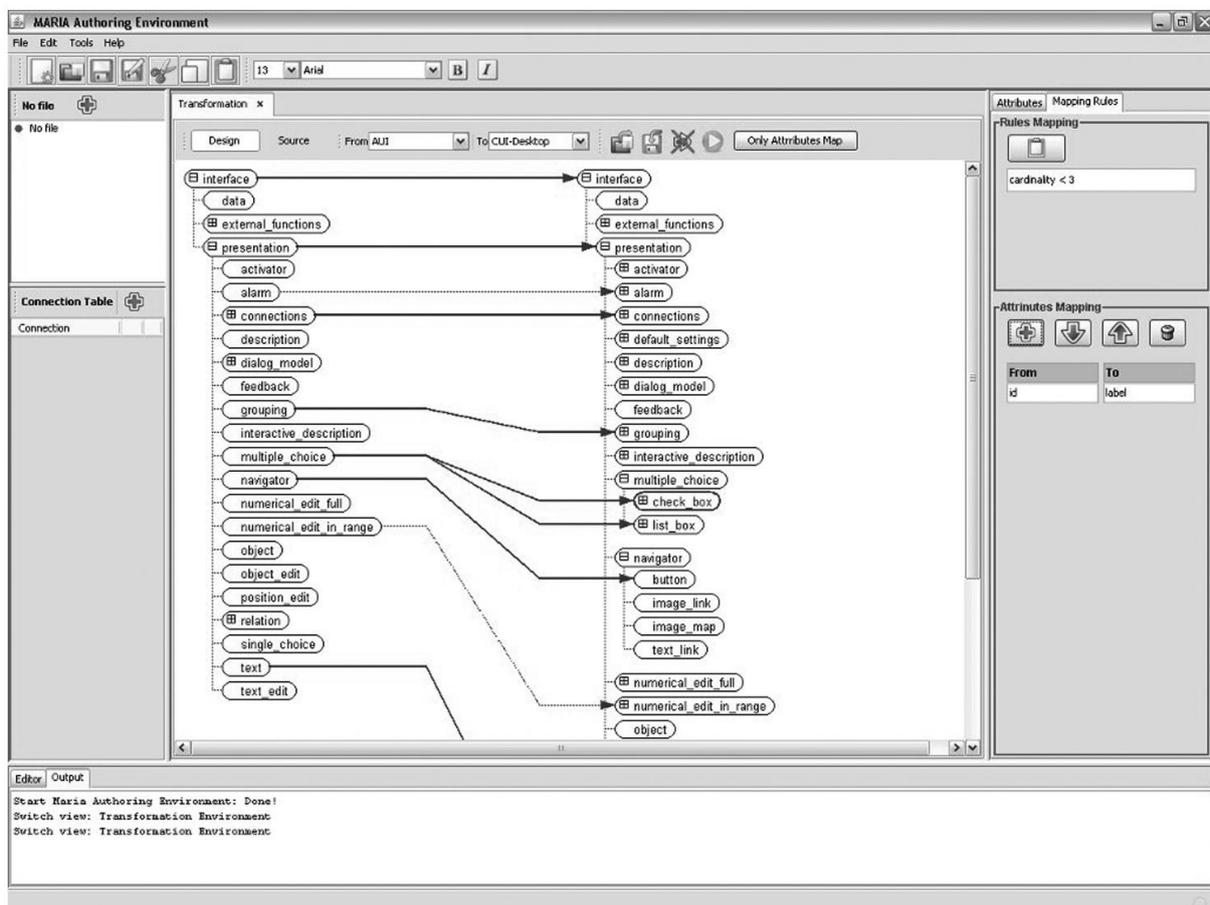
MARIA [Paternò et al. 2009] est un environnement de développement d'IHM basé sur les modèles et s'appuyant sur Cameleon. Maria permet de générer dynamiquement des IHM adaptées aux différentes plates-formes utilisées par un utilisateur en cas de migration d'une plate-forme à l'autre. MARIA permet de paramétrer les transformations entre les différentes couches de Cameleon, que ce soit de modèles à modèles pour les couches les plus hautes, ou de modèle à l'implémentation finale, au travers des règles d'adaptation. Il est par exemple possible de spécifier des règles génériques permettant d'associer des éléments de l'IHM concrète à des éléments de l'IHM abstraite, ou encore spécifier comment des éléments de l'IHM concrète seront implémentés dans l'IHM finale au travers d'une implémentation spécifique réalisée par un « serveur de migration ». Pour cela, MARIA nécessite de mapper les éléments du document source vers un document cible, en 3 étapes : (1) les structures des documents source et cible, via leurs descriptions structurées en XML, sont utilisées afin de générer une liste des éléments et des

attributs présents ; (2) le designer définit une correspondance ("mapping") entre éléments et attributs de la source et de la cible ; et (3) le document source et les correspondances sont utilisés en entrée du moteur d'adaptation afin de générer le document de sortie.

MARIA donne aussi la possibilité aux utilisateurs de modifier des règles via une interface graphique représentant l'arborescence des éléments de la source et de la cible, et permettant de redéfinir les correspondances entre les deux au travers de flèches Map entre un élément source et un élément cible (voir Figure 8). Cette arborescence est créée à partir d'une analyse des structures des documents sources et cibles. En termes de transformations, il est par exemple possible de définir, dans le cas d'une transformation de l'IHM abstraite à l'IHM concrète, que les éléments de la présentation servant à la navigation seront des boutons (d'autres possibilités étant des liens textuels ou des liens images).

Les auteurs présentent une implémentation de MARIA dans le cas d'un jeu Pac-Man, où un utilisateur migre entre une version PC du jeu à une version iPhone. L'adaptation à une plateforme mobile entraîne une division de l'IHM du jeu, unique sur PC, mais composée de deux pages sur mobile (interface de jeu, et interface de paramétrage du jeu). De plus, les modalités d'interaction sont aussi mises à jour : le clavier n'est plus une entrée, mais est remplacé par le multitouch du smartphone, ainsi que son accéléromètre. Enfin, certains interacteurs sont mis à jour, tels que les radio boutons sur PC qui sont remplacés par des listes déroulantes dans la version mobile.

Figure 8 : L'outil de transformation de MARIA, avec un exemple de correspondance entre les différents éléments d'une IHM abstraite et une IHM concrète



MARIA se focalise sur les environnements ubiquitaires, et donc sur l'aspect plateforme du contexte d'usage. Les caractéristiques de l'environnement (en tant que composantes du contexte d'usage) ne sont pas mentionnées, et les caractéristiques utilisateur ne le sont que très peu, ces derniers ayant par exemple la possibilité de saisir des préférences en termes d'adaptation de leurs interfaces. L'étendue du contexte d'usage pris en compte est donc restreinte, limitant ainsi la possibilité d'une gestion de l'incertitude des valeurs, qui n'est d'ailleurs pas mentionnée dans l'article, au même titre que la combinatoire possible des règles.

Cedar [Akiki 2014] fournit une architecture basée sur les modèles facilitant le développement d'IHM adaptatives au sein d'un progiciel, et s'appuie sur Cameleon. Les contributions de Cedar sont triples, avec (1) l'architecture Cedar à proprement parler, qui sert de référence pour le développement d'IHM d'applications adaptatives basées sur des modèles ; (2) RBUIS (pour « Role-Based User Interface Simplification », ou Simplification de l'interface utilisateur basée sur les rôles) est un mécanisme ayant pour but d'améliorer l'utilisabilité grâce à un comportement adaptatif, en fournissant aux utilisateurs finaux un ensemble minimal de fonctionnalités et une disposition optimale en fonction de leur contexte d'usage ; et (3) Cedar Studio, un environnement de développement intégré qui fournit un support d'outils pour la création d'interfaces utilisateur d'applications d'entreprise adaptatives basées sur des modèles à l'aide de RBUIS et basé sur l'architecture Cedar.

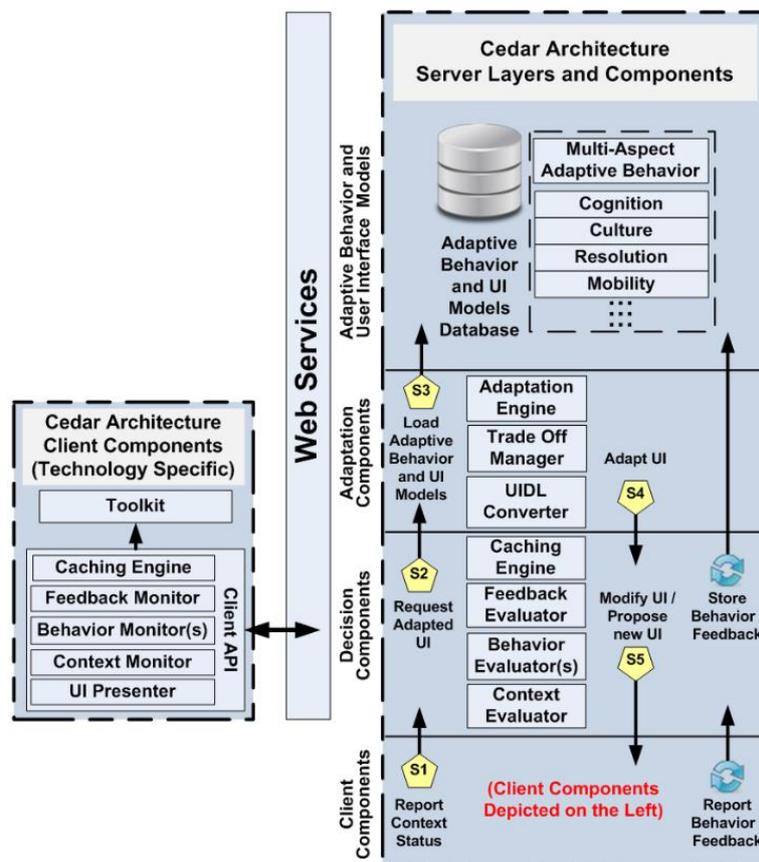
La Figure 9 présente l'architecture et le processus d'adaptation. Une adaptation de l'interface utilisateur peut se produire lorsqu'un changement de contexte est détecté par le moniteur de contexte (**S1**), qui le signale à l'évaluateur de contexte, si l'IHM nécessaire n'est pas déjà stockée côté client. Une décision est prise quant à savoir si l'IHM doit être adaptée. Le cache côté serveur est vérifié pour rechercher une version existante et adéquate. Si la version de l'IHM requise n'existe pas dans le cache, le moteur d'adaptation est appelé (**S2**) pour obtenir la nouvelle IHM. Le comportement adaptatif et les modèles d'IHM sont chargés (**S3**) à partir du serveur de base de données. Ce dernier stocke les modèles d'IHM (tâches, IHM abstraite et IHM concrète), les attributions de tâches et de rôles, les règles RBUIS pour la minimisation des fonctionnalités, ainsi que les workflows et scripts de comportement adaptatif pour l'optimisation de la disposition des éléments de l'IHM. L'IHM est ensuite adaptée (**S4**) via une minimisation de l'ensemble des fonctionnalités en fonction des attributions de tâche et de rôle effectuées au sein du modèle de tâche et une optimisation de la disposition en exécutant les workflows de comportement adaptatif. Enfin, l'IHM adaptée est renvoyée côté client afin d'être présentée à l'utilisateur final (**S5**).

Les règles « Role-Based User Interface Simplification » sont définies sous la forme de conditions utilisant la syntaxe SQL, tel que « taskname like '%ma_tâche%' » (par exemple « taskname like '%discount%' »). Elles se voient affecter aux modèles de tâches concernés et aux rôles auxquels elles s'appliquent. Un exemple est la révocation de l'accès au rôle « Caissier » sur toutes les tâches d'interaction contenant le mot à phrase « discount » dans le nom de la tâche. Lorsque plusieurs caractéristiques du contexte d'usage ont un impact simultané sur les mêmes éléments de l'IHM, un gestionnaire de compromis (« trade-off manager » en Figure 9) permet d'effectuer une analyse de compromis en s'appuyant sur des modèles d'objectifs. Les auteurs distinguent deux cas : les objectifs dits « crisp » et les objectifs « flous ». Dans le cas d'objectifs crisp, ceux-ci sont

simplement triés par priorité et les opérations associées à l'objectif le plus prioritaire sont appliquées. Concernant les objectifs « flous », les auteurs utilisent une combinaison entre une utilisation du principe de Pareto (ou principe des 80-20) et des fonctions de coûts afin de déterminer les adaptations à appliquer.

En conclusion, les adaptations de Cedar sont donc gérées en fonction de rôles à définir et assigner aux utilisateurs, permettant par exemple d'afficher une interface « complète » pour un utilisateur ayant le rôle de Gérant et une interface « simplifiée » pour un rôle de Caissier. Cedar permet ainsi d'avoir une adaptation efficace, mais implique de rester dans un cadre contrôlé. Cedar ne mentionne pas l'incertitude des valeurs ou la complexité des règles, et la combinatoire entre règles est gérée de deux manières : par un système de priorité pour les cas simples, et grâce au principe de Pareto et à des fonctions de coûts pour les objectifs flous.

Figure 9 : Les composants de l'architecture Cedar gérés par « Role-Based User Interface Simplification »



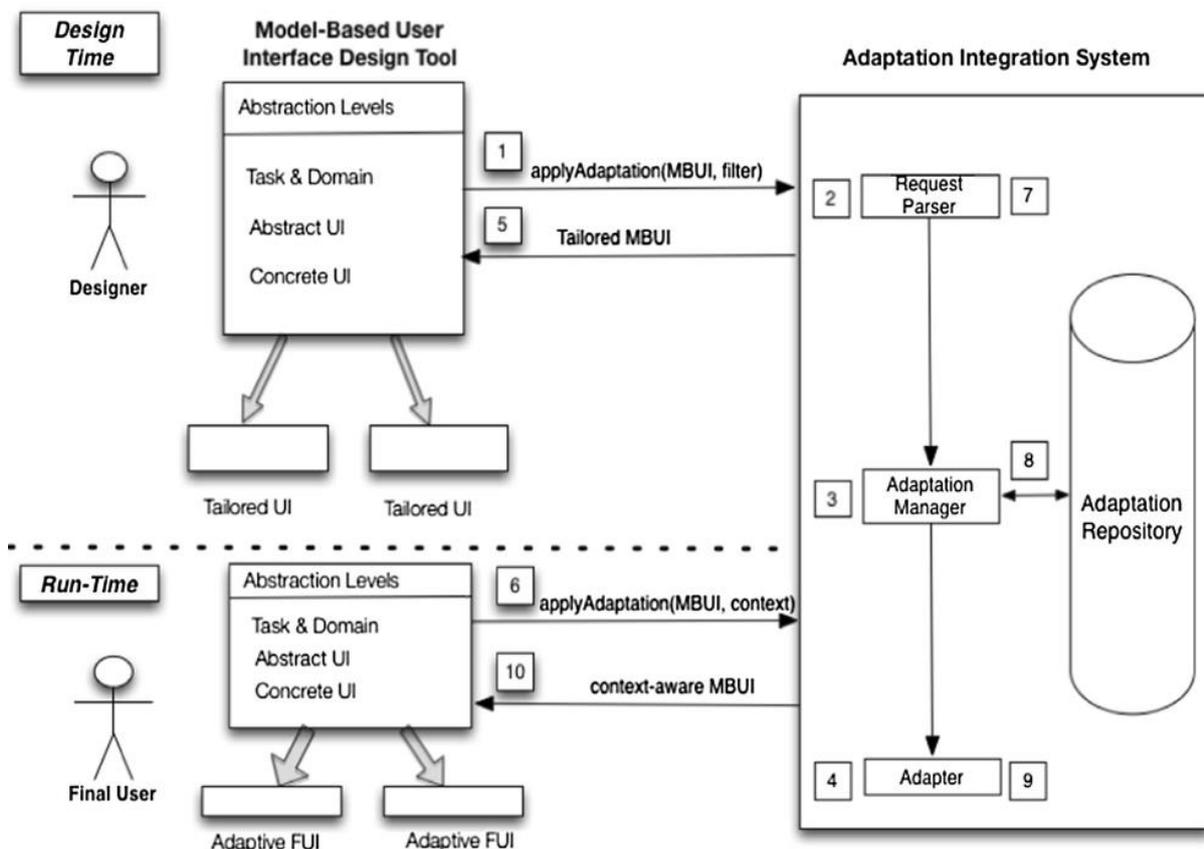
[Miñón et al. 2016] propose quant à lui un système nommé « Adaptation Integration System », basé sur Cameleon. Ce système vise à intégrer des exigences d'accessibilité pour des personnes en situation de handicap (par exemple : cécité, malvoyance, daltonisme, paraplégie, parkinson, ...) en incluant les règles d'adaptation dans le processus de développement.

L'architecture de ce travail est présentée en Figure 10. A la conception, le concepteur, au travers de l'outil de conception d'IHM basée sur les modèles, spécifie la description logique de l'IHM, son niveau d'abstraction et les handicaps à considérer (étape n°1 de la Figure 10). L'analyseur de requêtes (2) est le module en charge d'analyser les paramètres de la requête reçue puis d'envoyer

une requête au gestionnaire d'adaptation (3). Celui-ci sélectionne les règles d'adaptation à appliquer selon les paramètres de la requête. Ces règles d'adaptation sont définies au format ECA (Event Condition Action), et sont priorisées afin d'éviter les conflits entre plusieurs règles. Le module d'adaptation (4) est ensuite chargé d'appliquer les règles d'adaptation sélectionnées afin de générer une interface adaptée (5). A l'exécution, le processus est similaire. Il débute lorsqu'un changement significatif du contexte d'usage est détecté entraînant un envoi du contexte d'usage de l'utilisateur final, comprenant notamment ses caractéristiques et handicaps (6). Les étapes 7, 8 et 9 sont identiques aux étapes 2, 3 et 4 détaillées ci-dessus. En dernier lieu, l'interface adaptée est présentée à l'utilisateur final (10).

Les règles, étant de type Event Condition Action, sont décomposables en trois parties : (1) une évènement déclencheur, qui est optionnel (par exemple « LORSQUE la vitesse de marche de l'utilisateur augmente ») ; (2) une condition, qui peut être simple ou complexe via l'utilisation des opérateurs ET, OU et NON (par exemple « SI la vitesse de marche de l'utilisateur est supérieure à 3 km/h ET que l'utilisateur a une faible acuité visuelle ET que la modalité de l'IHM est graphique ») ; et (3) une action (par exemple « ALORS la modalité est passée en multimodale » afin de permettre à l'utilisateur de sélectionner la modalité qui lui convient le mieux pendant qu'il marche).

Figure 10 : Architecture du « Adaptation Integration System »



Ce travail utilise des caractéristiques liées aux handicaps de l'utilisateur (s'il est aveugle, malvoyant, daltonien, ...), mais celles-ci restent peu nombreuses, et l'incertitude des valeurs de ces caractéristiques n'est pas prise en compte. La combinaison de handicaps est gérée lors de la définition des règles d'adaptation, par la combinaison de plusieurs conditions, augmentant de fait

la complexité des règles. Cela peut mener à une explosion de la complexité lorsque le nombre de caractéristiques prises en compte et le nombre de règles augmentent.

Il existe une multitude de travaux se basant sur Cameleon, et les trois articles présentés ci-dessus [Paternò et al. 2009 ; Akiki 2014 ; Miñón et al. 2009] permettent de mettre en avant la diversité des architectures possibles basées sur Cameleon. Toutefois, ces travaux ne se penchent pas ou très peu sur l'explosion combinatoire possible dans le cas d'un passage à l'échelle, où un système aurait à gérer un grand nombre de caractéristiques de contexte ainsi qu'un grand nombre de règles d'adaptation, d'autant plus si celles-ci sont complexes. Le contexte d'usage pris en compte est relativement limité, et l'incertitude des valeurs ainsi que la problématique de la complexité des règles ne sont pas mentionnées.

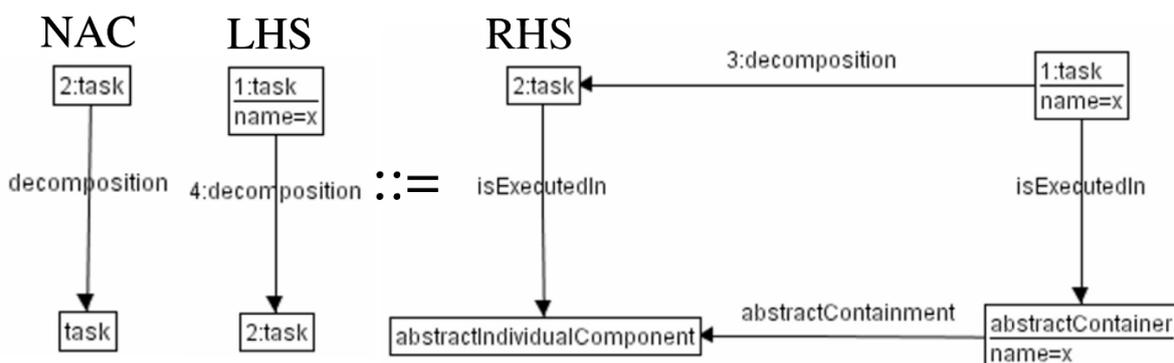
2.1.3 Expression des règles dans les travaux issus de Caméléon

Les articles suivants [Limbourg et al. 2004 ; Sottet et al. 2006 ; Aquino et al. 2009] permettent de mettre en avant différentes possibilités en termes d'expression des règles, et nous centrerons leur présentation sur cet aspect.

[Limbourg et al. 2004] notent que dans les approches qu'ils nomment « classiques », les règles sont « codées en dur », ce qui leur semble induire une faible flexibilité. Pour pallier cette lacune, ce travail propose d'utiliser la mécanique des transformations de graphes [Freund et al. 1992], un graphe étant une structure particulière avec des nœuds et des arcs. Une transformation de graphe correspond au remplacement d'une partie du graphe par une autre, selon le contexte d'usage courant et les règles mises en place. Par exemple, la Figure 11 présente une règle permettant d'effectuer l'adaptation suivante : pour chaque tâche finale d'un arbre de tâches, créer un composant individuel abstrait. Pour chaque tâche parent d'une tâche finale, créer un conteneur abstrait. Lier le conteneur abstrait et le composant individuel abstrait par une relation de conteneur/contenu.

Cependant, les règles étant associées à des contextes particuliers, leur nombre risque d'augmenter fortement dans le cas d'un passage à l'échelle. Par ailleurs, les auteurs pointent, dans [Limbourg et al. 2005], que les règles risquent d'être en conflit et/ou en dépendance les unes avec les autres (conduisant à l'impossibilité de produire un résultat), sans indiquer de moyens d'éviter de façon certaine ce problème. Enfin, il n'est pas mentionné comment la problématique de la complexité des règles et l'incertitude sont gérées.

Figure 11 : Exemple de règle de [Limbourg et al. 2004] permettant la création de composants individuels abstraits dérivés de tâches finales.



[Sottet et al. 2006] présentent un framework d'ingénierie dirigée par les modèles pour le développement d'IHM plastiques. Ce framework regroupe un ensemble de modèles et de méta-modèles basés sur les différentes couches de Cameleon et permet d'effectuer des transformations entre ceux-ci pour la génération d'IHM adaptée. Les règles sont exprimées en ATL (« ATLAS Transformation Language », un langage de transformation de modèles). Deux exemples de « règles très simples » (dixit les auteurs) sont donnés (voir ci-dessous). La première règle, TaskToSpace, permet de créer un espace de travail (« w » dans l'exemple) pour chaque tâche utilisateur : l'espace de travail est simplement instancié et seul son attribut name est affecté, en prenant le nom de la tâche. La seconde règle, OrOperatorToSequence, transforme tous les opérateurs OR (« o » dans l'exemple) entre deux sous-tâches utilisateur (o.RightTask et o.LeftTask) en deux espaces de travail de type séquence ayant chacun trois attributs : un nom (or), une origine (la tâche mère des deux sous-tâches) et une destination (l'une ou l'autre des deux sous-tâches).

```

module M2TaskToM2Workspace {
  from M1Task : M2Task
  to   M1Workspace : M2Workspace

  -- One workspace for each task
  rule TaskToSpace {
    from t : M2Task!Task
    to w : M2Workspace!Space (
      name <- t.name
    )}

  -- OrOperator
  rule OrOperatorToSequence {
    from o : M2Task!BinaryOperator (
      o.name = "or"
    )
    to leftSequence : M2Workspace!Sequence (
      origin<- [Task2Space.e]o.motherTask,
      destination<-[Task2Space.e]o.rightTask )}
}

```

Ces deux exemples de règles ne permettent pas de se rendre compte de la complexité possible de celles-ci. Le langage ATL ne permettant pas d'exprimer des conditions en dehors des valeurs des attributs des éléments d'entrée et les auteurs ne présentant pas d'autre structure conditionnelle, ces exemples ne permettent pas non plus d'identifier comment les règles sont priorisées si besoin, ou comment certaines règles pourraient être ou non exécutées en fonction du contexte (par exemple pour ne pas afficher des parties optionnelles des tâches dans le cas où l'utilisateur a des difficultés de lecture). Enfin, le langage ATL ne permet pas d'exprimer une condition sur une plage de valeurs, ce qui rend impossible la prise en compte de l'incertitude des valeurs. Au final, cette proposition ne paraît pas pouvoir résoudre des situations complexes dans lesquelles des règles opposées devraient être mises en œuvre, par exemple pour réduire la taille du texte sur une petite surface d'affichage et l'agrandir pour un utilisateur malvoyant.

[Aquino et al. 2009] se focalisent sur la transformation d'une AUI en une CUI, et ont pour but d'améliorer la flexibilité dans le paramétrage des transformations. Pour optimiser le passage AUI vers CUI, les auteurs introduisent des « profils de transformation » afin d'externaliser et de paramétrer les règles de transformations de modèles d'AUI vers CUI, et pour réutiliser les connaissances entre différents projets de développements. Un profil de transformation est composé d'un ensemble de « Mapping Model » et d'un template de transformation. Les mises en correspondance entre modèles spécifient comment concrétiser un interacteur abstrait en interacteur concret. Chaque mise en correspondance est composée d'une source (un objet d'interaction abstrait, provenant du modèle d'IHM abstraite); de zéro, une ou plusieurs conditions, d'une cible (un objet d'interaction concret du modèle d'IHM concrète), et d'une priorité. Plus particulièrement, ce travail se focalise sur des interacteurs graphiques tels que les séparateurs (un décorateur), les champs de saisie de texte (un composant graphique individuel) ou les fenêtres (un conteneur graphique).

La Figure 12 présente un extrait des mises en correspondance utilisées dans un cas d'étude (un système de gestion d'une agence de photographie), permettant de réorganiser différents « ArgumentGrouping » de type groupe (un conteneur d'interacteurs, correspondant au fieldset en HTML) en un enchaînement de fenêtres, sous la forme d'un assistant logiciel (ou « wizard »). Les ArgumentGrouping seront ainsi présentés un à un, séquentiellement, et associés à des boutons « suivant » et « annuler » pour les premiers, et des boutons « OK » et « annuler » pour le tout dernier. Les mises en correspondance permettent ainsi au concepteur de spécifier quels widgets sélectionner et comment les positionner. Différentes mises en correspondance peuvent être définies pour répondre à différentes plateformes et aux préférences de l'utilisateur final.

Les auteurs précisent que les préférences des utilisateurs peuvent être définies par le biais d'un fichier de configuration spécifique dans l'application finale, permettant à l'utilisateur de préciser ses propres préférences et ainsi adapter l'IHM à celles-ci. Ils citent en exemple une modification des couleurs, de la police de caractère ou encore de la position des fenêtres. Cependant, aucune précision supplémentaire n'est donnée à ce niveau-là.

Les caractéristiques des utilisateurs ne sont pas mentionnées à proprement parler, hormis lorsque les auteurs précisent que leur approche permet de prendre en compte les besoins et préférences utilisateurs. L'incertitude des valeurs n'est pas traitée non plus. En termes de combinatoire des règles, un système de priorité propre à chaque règle permet d'éviter les conflits.

Figure 12 : Un extrait de mises en correspondance de modèles utilisées dans [Aquino et al. 2009]

Source	Conditions	Target	Mapping Number
<i>Service IU</i>	<i>Service IU</i> does not have <i>Argument Grouping</i> elements of type group	<i>window</i> that contains a <i>border-Box</i> which encloses a <i>top-Box</i> and a <i>bottomBox</i> . The <i>topBox</i> contains a <i>groupBox</i> . The <i>bottomBox</i> contains a right-aligned <i>flowBox</i> with OK and Cancel <i>buttons</i>	1
<i>Argument Grouping</i>	<i>Argument Grouping</i> type is group and the <i>Argument Grouping</i> is the last group of a <i>Service IU</i>	<i>window</i> that contains a <i>border-Box</i> which encloses a <i>top-Box</i> and a <i>bottomBox</i> . The <i>topBox</i> contains a <i>groupBox</i> . The <i>bottomBox</i> contains a right-aligned <i>flowBox</i> with OK and Cancel <i>buttons</i>	2
	<i>Argument Grouping</i> type is group and the <i>Argument Grouping</i> is not the last group of a <i>Service IU</i>	<i>window</i> that contains a <i>borderBox</i> which encloses a <i>topBox</i> and a <i>bottomBox</i> . The <i>topBox</i> contains a <i>groupBox</i> . The <i>bottomBox</i> contains a right-aligned <i>flowBox</i> with Next and Cancel <i>buttons</i>	3
	<i>Argument Grouping</i> type is argument and <i>Argument Grouping</i> is related to a string or integer input argument	horizontal-oriented <i>box</i> that contains an <i>outputText</i> and an <i>inputText</i>	4
<i>Defined Selection</i>		<i>radioButton</i>	5
<i>Introduction</i>	<i>Introduction</i> type is integer and <i>Introduction</i> specifies a valid value range	<i>Spin</i>	6

Les travaux de cette section [Limbourg et al. 2004 ; Sottet et al. 2006 ; Aquino et al. 2009] se basent sur le cadre de référence Cameleon et permettent de mettre en avant différents moyens d'expressions des règles d'adaptation. [Limbourg et al. 2004] propose ainsi l'utilisation de transformation de graphes, [Sottet et al. 2006] utilise quant à lui des règles ATL (ATLAS Transformation Language), alors que [Aquino et al. 2009] se base sur des « mapping model » et des templates de transformation. Toutefois, ces travaux ne se penchent pas particulièrement sur nos verrous que sont la combinatoire des règles, la gestion de la complexité de celles-ci, ainsi que l'incertitude des caractéristiques du contexte d'usage.

2.2 Approches d'adaptation basées sur les modèles

Dans cette sous-section, nous présentons une sélection de travaux [Fink et al. 1996 ; Gajos et al. 2010 ; Yigitbas et al. 2020] proposant des approches d'adaptation des IHM basées sur les modèles, en dehors du cadre de référence Cameleon que nous venons de décrire ci-dessus.

[Fink et al. 1996] présentent le projet AVANTI ayant pour but de répondre aux besoins hétérogènes et individuels des utilisateurs (les auteurs citent notamment les touristes, citoyens,

personnes âgées, aveugles, personnes en fauteuil roulant ou encore des utilisateurs ayant une forme légère de dystrophie), dans le cadre d'un système d'information distribué permettant de donner des informations hypermedia à propos d'une zone métropolitaine.

Des informations sur un utilisateur sont récupérées à partir d'une interview initiale, puis suite à son interaction avec l'outil. Un moteur d'inférence est chargé de calculer de nouvelles informations potentielles concernant l'utilisateur, et un moteur d'adaptation chargé d'appliquer des règles d'adaptation. Les adaptations se basent à la fois sur un modèle de l'utilisateur, mais aussi sur un modèle de « groupes d'utilisateurs », ou stéréotypes (par exemple : touriste, ou personne aveugle...) défini à partir de l'interview ou de l'interaction avec le système. Les règles d'adaptation vont permettre d'afficher des éléments de l'IHM alternatifs ou optionnels (par exemple, des informations concernant l'accessibilité d'un bâtiment pour une personne à mobilité réduite, si l'utilisateur est dans ce cas). Ci-dessous sont présentés deux exemples de règles d'adaptation :

- (1) IF novice in computing AND motor impaired THEN Font = Large AND Size = Large
- (2) IF disoriented OR user idle THEN SpeechVolume = High

Il est ainsi possible de combiner plusieurs conditions au sein d'une même règle, mais la combinatoire entre plusieurs règles n'est pas mentionnée, et risque de poser des problèmes avec une augmentation des caractéristiques et des règles, au même titre que la gestion de la complexité des règles. L'incertitude des valeurs n'est pas non plus mentionnée. Enfin, l'étendue du contexte d'usage prise en compte est quant à elle relativement faible, ne considérant qu'un nombre restreint de caractéristiques.

Supple [Gajos et al. 2010] prend en charge la génération automatique d'IHM adaptées aux capacités, aux appareils, aux tâches, et aux préférences de chaque utilisateur, suivi d'une adaptation dynamique en cas de changement de contexte. Pour cela, il se base sur une spécification d'interface utilisateur fonctionnelle, un modèle des capacités et des limitations de la plateforme, une fonction de coût et un modèle d'utilisation optionnel reflétant la manière dont l'interface est utilisée. Le processus d'adaptation consiste à chercher une interface ayant le coût minimal pour un utilisateur. Ce travail a fait l'objet d'une extension nommée Supple++ [Gajos et al. 2007], mettant en avant une fonction de coût plus complexe, et permettant de prendre en compte les besoins des utilisateurs ayant des handicaps visuels ou moteurs.

Supple utilise deux types de fonctions de coût pour guider le processus d'optimisation : le premier permet une adaptation basée sur un modèle des préférences des utilisateurs en termes de présentation des interfaces graphiques, et le second modélise la capacité d'une personne à contrôler le pointeur.

Les préférences des utilisateurs ont été récupérées grâce à *Arnauld* [Gajos et al. 2005], un système consistant à faire passer deux tests aux utilisateurs. Le premier où l'utilisateur est présenté à deux fragments d'interface fonctionnellement équivalents mais qui diffèrent en termes de présentation. Dans le second test, les utilisateurs sont confrontés à des interfaces que Supple pourrait générer pour eux et ils ont la possibilité de suggérer des améliorations possibles, que l'enquêteur utilise afin de paramétrer plus précisément le processus de génération. Ces nouvelles

adaptations étant elles-aussi utilisées par *Arnauld* dans la détermination des préférences utilisateur. Le second test consiste à modéliser la capacité de contrôle du curseur des utilisateurs en fonction des performances obtenues sur quatre tâches : le pointage, le glissement, la sélection de liste et la réalisation de multiples clicks sur une cible unique.

Concernant le modèle de préférences, *Supple* se base sur 50 facteurs d'interface utilisateur (taille de police, taille des widgets, utilisation d'onglet, etc.) afin de déterminer le coût des différentes interfaces possibles et renvoyer celle qui a le coût minimal pour l'utilisateur. Concernant la capacité de contrôle du curseur des utilisateurs, *Supple* calcule le temps de mouvement estimé de l'utilisateur pour la réalisation de tâche typiques.

Théoriquement, toutes les caractéristiques du contexte d'usage peuvent être prises en compte, en incluant les handicaps. Cependant, il a été noté dans [Peissner et al. 2012] que les performances de *Supple* sont problématiques car elles excèdent des temps raisonnables ; cela serait donc d'autant plus vrai en cas de grand nombre de caractéristiques et des fonctions de coûts toujours plus complexes. De plus, les tests à réaliser en premier lieu sont relativement longs (entre 45 et 120 minutes pour les deux tests) et nécessitent apparemment la présence d'un enquêteur pour paramétrer *Supple*. Enfin, rien ne mentionne l'incertitude de leurs valeurs.

[Yigitbas et al. 2020] présentent une approche de développement basée sur les modèles couplant un développement classique d'IHM basé sur les modèles avec un développement basé sur les modèles du contexte d'usage et des règles d'adaptation de l'IHM.

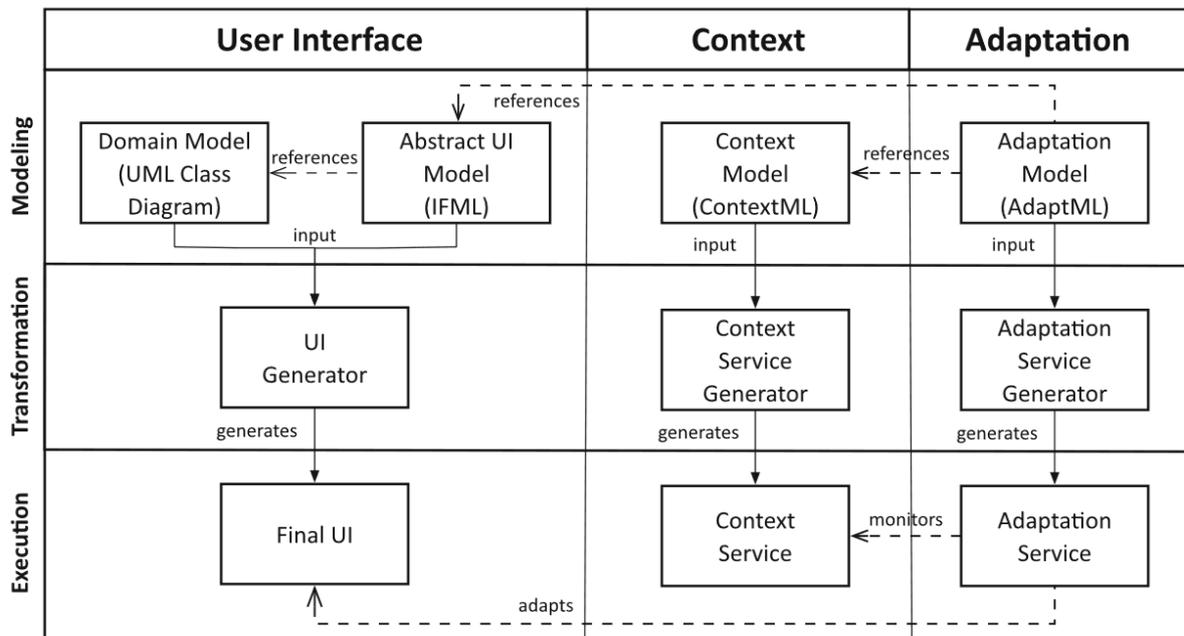
L'approche, décrite en Figure 13, est basée sur le langage de modélisation d'interfaces utilisateur IFML ; elle introduit de nouveaux langages de modélisation pour le contexte d'utilisation (ContextML) et les règles d'adaptation d'interface utilisateur (AdaptML). Les règles d'adaptation utilisent la logique booléenne. Elles sont constituées de conditions devant satisfaire une ou plusieurs prémisses, et d'une adaptation résultat, telles que « Si l'utilisateur est en train de marcher, alors la modalité d'interaction est passée en vocal » ou encore « Si la luminosité ambiante détectée est inférieure à 100, alors le contraste est augmenté ». Ces règles ont des poids afin de gérer la priorité d'exécution en cas de conflits.

Le code généré de l'interface, basé sur le modèle IFML (Interaction Flow Modeling Language), est couplé aux services de contexte et d'adaptation, générés respectivement à partir des modèles ContextML et AdaptML. L'intégration des artefacts générés, à savoir le code de l'interface, le contexte et les services d'adaptation, dans un environnement d'exécution global, permet d'adapter l'interface durant l'exécution.

Dans ce travail, les caractéristiques d'un utilisateur comprennent son âge (déclaré par l'utilisateur ou inféré), son genre, son humeur actuelle (heureux, triste, énervé, surpris...), son acuité visuelle, le port de lunettes de vue, sa langue, ainsi que son temps d'utilisation et son expérience de l'outil. Les caractéristiques de la plateforme regroupent quant à elles la hauteur et largeur de l'écran utilisé, le nom et la version du système d'exploitation, le type de plateforme en question, le type de connexion (wifi, données cellulaires, ...) et sa vitesse, le niveau de batterie, le fuseau horaire et une échelle de grossissement de la police de caractère. Enfin, les caractéristiques de l'environnement comprennent la luminosité et le niveau de bruit ambiants, la date et heure, la météo, et l'activité (à vélo, à pied, ou encore immobile).

Dans ce travail, des caractéristiques des trois aspects du contexte d'usage sont utilisées, mais le nombre de caractéristiques reste relativement faible, notamment pour l'aspect utilisateur (au nombre de huit). Aucune incertitude des valeurs des caractéristiques n'est mentionnée. Les caractéristiques de ce travail se rapprochent de celles de [Miñón et al. 2016], à la différence notable que [Miñón et al. 2016] est basé sur Cameleon alors que ce n'est pas le cas pour [Yigitbas et al. 2020].

Figure 13 : Architecture dirigée par les modèles pour des IHM adaptatives, par Yigitbas et al.



Les travaux décrits dans cette section [Fink et al. 1996 ; Gajos et al. 2010 ; Yigitbas et al. 2020] ont permis de présenter des approches basées sur les modèles, non apparentées au cadre de référence Cameleon. La prise en compte de l'étendue du contexte d'usage par ces travaux reste limitée, et, au même titre que les approches basées sur Cameleon, ces travaux présentent des lacunes au regard de nos autres problématiques, ne prenant pas en compte l'incertitude, et n'apportant pas de solution aux problématiques de complexité et de combinatoires des règles dans le cas d'un passage à l'échelle.

2.3 Autres approches d'adaptation

En plus des approches d'adaptation basées sur les modèles, certains travaux d'adaptation des IHM se sont penchés sur d'autres types d'approches, telles que l'utilisation de patrons de conception [Retalis et al. 2006 ; Peissner et al. 2012 ; Martin et al. 2016] ou encore l'utilisation de l'apprentissage automatique [Byun et al. 2004 ; Genaro Motti et al. 2012 ; Appriou et al. 2018]. Dans cette section, nous présentons le travail de [Peissner et al. 2012] basé sur les patrons de conception qui a la particularité de prendre en compte un nombre particulièrement important de caractéristiques utilisateurs. Dans un second temps, nous décrivons l'approche de [Genaro Motti et al. 2012] utilisant l'apprentissage automatique, et qui nous semble être la plus avancée au regard de nos problématiques.

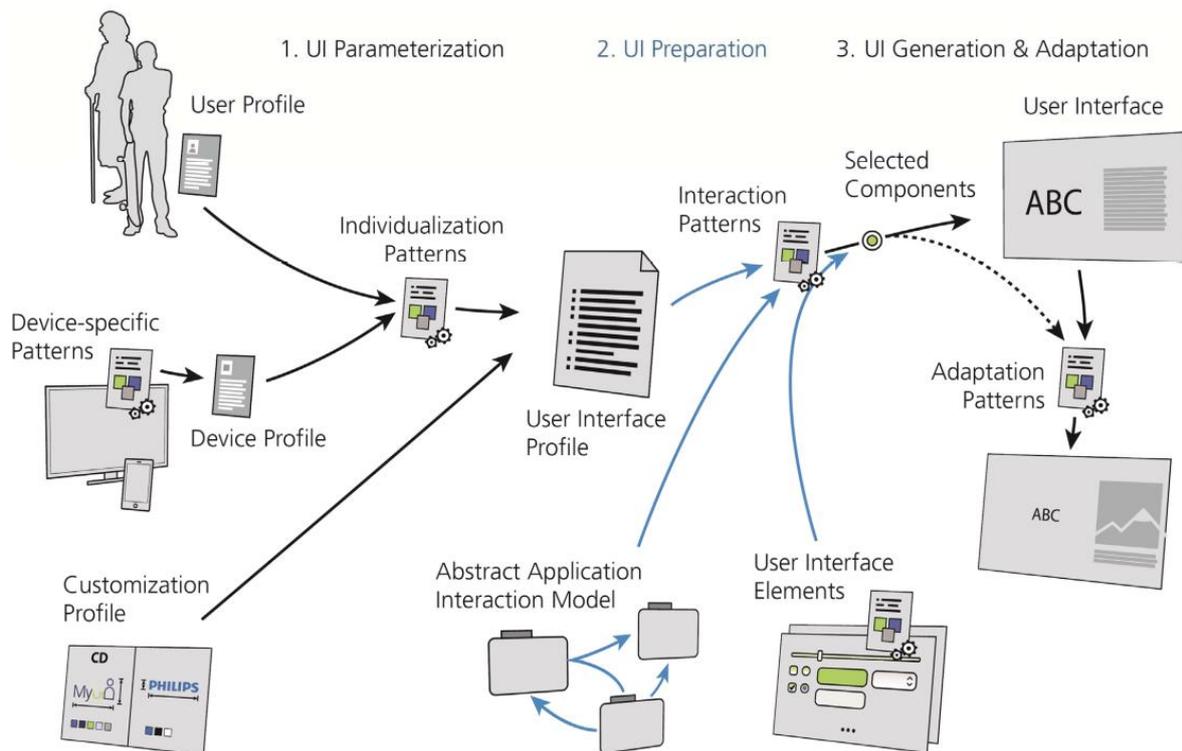
MyUI [Peissner et al. 2012] est une infrastructure de développement d'IHM visant à améliorer l'accessibilité par le biais d'une adaptation à l'utilisateur. Le processus d'adaptation de MyUI se déroule en 3 phases (voir Figure 14) : 1) le paramétrage de l'IHM, 2) la préparation de l'IHM, et 3) la génération et l'adaptation de l'IHM.

La première étape, le paramétrage de l'IHM, se base sur un « profil utilisateur » comprenant des informations sur l'utilisateur ainsi que son environnement actuel ; un « profil de plate-forme » comprenant des informations à propos des plates-formes disponibles et utilisées ; et un « profil de personnalisation » comprenant les paramètres de personnalisation définis par le développeur. Cette étape vise à générer un « profil d'IHM », définissant les caractéristiques générales de l'IHM reflétant les besoins spécifiques liés à l'utilisateur courant, son environnement et sa ou ses plateformes, tels que les différentes tailles de police de caractères (titres ou corps, par exemple) ou encore le « mode d'affichage » qui sera utilisé (allant de « principalement texte » à « seulement graphique »). L'étape suivante, la préparation de l'IHM, a pour but de sélectionner les composants et éléments de l'interface les plus adaptés à la situation courante de l'utilisateur. Pour cela, elle se base sur le profil d'IHM généré suite à la première étape, et sur un « modèle d'interaction d'application abstrait » définissant les situations d'interaction possibles pour chaque état de l'application. Enfin, l'étape de génération et d'adaptation de l'IHM utilise la sortie de l'étape 2, les composants de l'interface sélectionnés, afin de générer dynamiquement une interface finale complète et adaptée en accord avec le contexte d'usage connu.

Les règles d'adaptation sont ici gérées grâce à une base de patrons de conception. Différents patrons sont sélectionnés afin de répondre au mieux aux besoins utilisateurs déduits du contexte d'usage. L'adaptation de l'interface se traduisant par un nouveau choix de patron, supposé être le plus approprié pour le contexte donné. Par exemple, le groupe « mode d'affichage » regroupe cinq patrons de conception permettant de décider quel est le ratio entre texte et graphique à mettre en œuvre (texte uniquement, principalement texte, texte et graphiques, principalement graphique, et graphiques uniquement). Le patron de conception « principalement graphiques », par exemple, se traduit comme suit : (1) Problème : Les utilisateurs ayant des troubles moyens de réception au langage ont des difficultés à interpréter des interacteurs uniquement textuels. (2) Contexte : $\text{If (UnderstandingAbstractSigns} < 2 \text{ AND } 2 \leq \text{LanguageReception} < 3)$. (3) Solution : `Then set DisplayMode = "mainly graphics"`.

MyUI liste un grand nombre de caractéristiques utilisateurs, comprenant ses informations personnelles (son nom, son âge, son email, ...), ses caractéristiques (son acuité visuelle, son champ de vision, son ouïe, sa réception au langage, son attention, sa précision des doigts, mains, bras, ou encore l'expérience de l'utilisateur sur l'application utilisée), ainsi que ses préférences (langue préférée, sortie vocale optionnelle, ...). Cependant, ces caractéristiques sont principalement déclarées par l'utilisateur, et MyUI utilise des seuils fixes pour définir les différents états d'une caractéristique, sans gestion de l'incertitude. En termes de règles, MyUI se focalise sur une amélioration de l'accessibilité en fonction de certains handicaps.

Figure 14 : Génération et adaptation d'IHM via MyUI



[Genaro Motti et al. 2012] se penchent sur l'utilisation de l'Apprentissage Automatique (Machine Learning) pour adapter des IHM au contexte d'usage, principalement dans le but d'optimiser les interactions des utilisateurs et de limiter leurs erreurs. L'apprentissage automatique permet de gérer des données complexes et floues, et de calculer des inférences complexes à partir de celles-ci.

Les auteurs indiquent que le processus d'apprentissage, dans le cas de l'apprentissage automatique, se produit lorsque : (1) les priorités (ou poids) des règles d'adaptation sont modifiées dans un arbre de décision, fournissant des résultats d'adaptation plus adaptés au contexte de l'utilisateur, (2) les enregistrements du précédent comportement d'interaction sont analysés et des schémas récurrents sont identifiés, permettant d'aider le moteur d'adaptation à effectuer automatiquement de nouvelles adaptations, et (3) un retour négatif est donné par l'utilisateur suite à une adaptation venant d'être mise en place, entraînant la diminution du poids d'une technique d'adaptation au sein du moteur.

Les approches en apprentissage automatique reposent sur le comportement et les retours de l'utilisateur final. Par exemple, si un certain schéma d'interaction est identifié dans les logs d'interaction de l'utilisateur, il est probable que la navigation dans l'application puisse être optimisée en conséquence. Et si l'utilisateur accepte l'adaptation proposée par le système, ce retour d'expérience est utilisé par le moteur pour définir cette adaptation comme réussie, à l'inverse si l'utilisateur refuse l'adaptation, le moteur diminuera le poids de celle-ci afin de proposer une nouvelle adaptation.

Cependant, cela entraîne la nécessité de présenter des interfaces qui ne sont pas les plus adaptées aux utilisateurs, tant que les retours positifs et négatifs n'ont pas été effectués en

nombre suffisant. De plus, cet article présente des cas d'applications potentiels, mais aucun n'a réellement été mis en pratique. Enfin, les auteurs ne mentionnent pas l'incertitude des valeurs des caractéristiques à proprement parler mais, comme mentionné en début de description, l'apprentissage automatique en lui-même permet une prise en compte de données complexes et floues. De même, la combinatoire des règles n'est pas mentionnée spécifiquement par les auteurs, mais est gérée par l'apprentissage automatique.

3 Approches d'adaptation des IHM basées sur la logique floue

La logique floue, détaillée dans le chapitre suivant, peut être vu comme une extension de la logique booléenne classique, permettant notamment une gestion intrinsèque de l'incertitude des valeurs d'entrées. Un certain nombre de travaux se sont penchés sur des problématiques d'adaptation utilisant la logique floue [Beka Be Nguema et al. 2000 ; Nyongesa et al. 2003 ; Cao et al. 2005 ; Desruelle et al. 2011 ; Papatheocharous et al. 2012 ; Soui et al. 2013 ; Cueva-Fernandez et al. 2016].

Certains travaux se focalisent sur une adaptation à la plateforme, tel que [Desruelle et al. 2011], et d'autres se penchent sur une adaptation de l'IHM en fonction de services prédéfinis, comme par exemple « Passer une commande » ou « Effectuer une recherche » chez [Nyongesa et al. 2003], ou encore l'adaptation d'un tchat textuel en tchat vocal ou tchat vidéo décrit par [Cao et al. 2005]. Nous allons ici présenter des travaux d'adaptation en logique floue se rapprochant le plus de nos problématiques.

[Papatheocharous et al. 2012] propose un mécanisme d'adaptation d'IHM basé sur la logique floue. Le processus d'adaptation présenté se décompose en deux parties : la modélisation utilisateur, et le système en logique floue pour l'adaptation. En termes de modélisation utilisateur, les auteurs se basent sur la capacité de mémoire de travail des utilisateurs, et sur les deux styles cognitifs définis par [Riding et al. 1991] : « Verbal/Imager » ou « Analyst/Wholist ».

La dimension « Verbal/Imager » se réfère à la façon dont les utilisateurs traitent des informations et est subdivisée en trois classes : « Verbal », intermédiaire et « Imager ». Les utilisateurs appartenant à la classe « Verbal » peuvent traiter des informations textuelles ou audio plus efficacement que des images, et inversement pour les utilisateurs appartenant à la classe « Imager ». La classe intermédiaire est utilisée pour les utilisateurs n'ayant pas de préférence particulière à ce niveau.

La dimension « Wholist/Analyst » se réfère quant à elle à la manière dont les utilisateurs organisent des informations. Elle est organisée de la même manière en trois classes : « Wholist », intermédiaire et « Analyst ». Les utilisateurs « Wholist » voient une situation et organisent les informations dans leur ensemble, et sont sensés prendre une approche linéaire dans le cas de la navigation hypermédia. Les utilisateurs « Analyst » voient quant à eux une situation comme une collection de différentes parties, ils se focalisent sur un ou deux aspects à la fois et sont supposés prendre une approche non linéaire dans le cas d'une navigation hypermédia.

Les auteurs utilisent des réseaux de neurones artificiels afin de classer les utilisateurs au sein de ces styles cognitifs. Les utilisateurs peuvent ainsi appartenir à plusieurs groupes selon différents

degrés traduisant leur affinité pour le groupe concerné. En fonction de ces degrés d'appartenance, les auteurs prévoient implications suivantes en termes d'adaptation :

- Imager : La présentation des informations est améliorée visuellement sous une forme de représentation schématique
- Verbal : Utilisation de texte, sans enrichissement visuel.
- Analyst : La structure du contenu est fragmentée en liens clairs pour correspondre à une vue analytique des éléments
- Wholist : La structure du contenu suit un modèle plus holistique
- Intermédiaire : Utilisation d'une condition équilibrée entre les préférences opposées
- Capacité de travail (faible) : Ajout d'un outil permettant d'ajouter des hyperliens au sein de la section que l'utilisateur visite

Quelques exemples de règles d'adaptation théoriques sont donnés par les auteurs, tels que « Si un utilisateur est low-Verbal ET high-Imager ALORS fournir tout le contenu à travers des diagrammes et des images » ou encore « Si a un utilisateur est high-Imager ET a une faible mémoire de travail ALORS fournir un outil supplémentaire qui lui permet de saisir des informations relatives aux objectifs dans une représentation schématique ».

Cette approche ne gère qu'un nombre restreint de caractéristiques, avec un total de sept. De plus, l'approche comprend une gestion manuelle de la composition des règles. Cela est moins problématique que dans le cas de la logique booléenne étant donné que la logique floue, de par sa gestion de l'incertitude, permet une prise en compte intrinsèque de la combinatoire des règles. Cependant, cela limite tout de même les compétences du système et sa capacité à prendre en charge des situations inattendues. De plus, une augmentation du nombre de règles et de caractéristiques prises en compte implique des règles de plus en plus complexes.

[Soui et al. 2013] présente une approche pour la personnalisation d'IHM grâce à la logique floue, se basant sur des relations sémantiques entre les métadonnées des composants d'IHM et les préférences utilisateurs afin de sélectionner les composants les plus adaptés. Les auteurs présentent un cas d'étude permettant de calculer le niveau de complexité d'un cours à donner à un utilisateur, en fonction de son nombre d'années d'étude et son nombre d'années d'expérience professionnelle. Pour cela, ils définissent les neuf règles floues suivantes :

IF (Experience is low) AND (Study_level is low) THEN (Difficulty-level is very-easy)

IF (Experience is low) AND (Study_level is medium) THEN (Difficulty-level is easy)

IF (Experience is low) AND (Study_level is high) THEN (Difficulty-level is medium)

IF (Experience is medium) AND (Study_level is low) THEN (Difficulty-level is easy)

IF (Experience is medium) AND (Study_level is medium) THEN (Difficulty-level is medium)

IF (Experience is medium) AND (Study_level is high) THEN (Difficulty-level is difficult)

IF (Experience is high) AND (Study_level is low) THEN (Difficulty-level is medium)

IF (Experience is high) AND (Study_level is medium) THEN (Difficulty-level is difficult)

IF (Experience is high) AND (Study_level is high) THEN (Difficulty-level is very-difficult)

Cependant, il n'est pas précisé comment la variable de sortie de ce cas d'étude, Difficulty-level, est ici utilisée pour adapter l'IHM.

Les variables utilisées dans le cas d'étude sont au nombre de trois (deux entrées et une sortie), ce qui est très faible. La combinatoire entre différentes entrées est là aussi définie manuellement au sein des règles, impliquant la même chose que pour [Papatheocharous et al. 2012].

Enfin, [Cueva-Fernandez et al. 2016] propose une plateforme, Vitruvius, permettant à des conducteurs ou des passagers de voiture de créer des applications au moyen d'une interface vocale, sans connaissances particulières requises en programmation. Vitruvius reçoit et gère les données des capteurs présents dans une ou plusieurs voitures en temps réel afin de permettre aux utilisateurs de générer des applications utilisant différentes données du véhicule telles que la vitesse de déplacement, la position GPS, la température du liquide de refroidissement, la distance parcourue, la luminosité extérieure, etc. La collecte des données du véhicule nécessite l'installation d'un système de diagnostic embarqué (OBD-II). Des exemples d'applications sont donnés par les auteurs, tels que le suivi en temps réel de la position de véhicules sur une carte, l'affichage de la vitesse d'un véhicule sur chaque partie d'un itinéraire, ou encore l'envoi d'une notification à chaque fois qu'un véhicule dépasse un certain niveau d'émission de CO₂.

La logique floue est ici utilisée pour calculer le niveau d'expertise et de concentration de l'utilisateur afin de déterminer le « niveau d'expertise » de l'utilisateur, c'est-à-dire le classer en tant que profil débutant, intermédiaire ou expert. En fonction de ces différents niveaux, l'outil donnera à l'utilisateur des options plus ou moins avancées, associées à des descriptions détaillées (pour un débutant) ou abrégées (pour un expert). Les règles floues utilisées sont au nombre de sept. Elles utilisent dix caractéristiques d'entrée : le nombre d'utilisation de la commande « Répéter », ainsi que « Aide », « Retour arrière » et « Recommencer du début » ; le nombre d'applications que l'utilisateur a déjà générées ; le nombre d'« actions » (les étapes du développement) complétées ou échouées par l'utilisateur ; le nombre de mots-clés utilisés hors de contexte, le nombre de mots prononcés pour une action ; ainsi que le nombre de jurons. Ces dix caractéristiques sont utilisées afin de modifier une sortie unique : le niveau d'expertise de l'utilisateur. Les variables linguistiques utilisées, présentées en Figure 15, ont été définies à la suite d'une série de tests avec des utilisateurs experts et non-experts. Toutefois, les auteurs ne donnent pas le détail de ces tests. Ci-dessous les règles floues utilisant ces variables (sic) :

1. IF RepeatCount IS a_enough OR HelpCount IS a_enough THEN user_level IS beginner;
2. IF RepeatCount IS a_enough AND HelpCount IS a_enough THEN user_level IS beginner;
3. IF SwearWordCount IS a_few OR StartOverCount IS a_enough OR BackCount IS a_many OR KeyWordsOutOfContextCount IS a_many OR UserNotCompletedActionsCount IS a_many THEN user_level IS beginner;
4. IF appsCreated IS a_enough AND RepeatCount IS a_few AND HelpCount IS a_few THEN user_level IS intermedium;

5. IF appsCreated IS a_enough AND StartOverCount IS a_few AND KeyWordsOutOfContextCount IS a_few AND SwearWordCount IS no AND HelpCount IS a_few AND completedActions IS a_enough THEN user_level IS intermedium;
6. IF appsCreated IS a_many AND RepeatCount IS a_few AND HelpCount IS a_few THEN user_level IS ad-vanced;
7. IF averageCountWords IS a_few AND RepeatCount IS a_few AND HelpCount IS a_few AND completedActions IS a_many THEN user_level IS advanced;

D'un point de vue technique, Vitruvius suit une architecture client-serveur (voir Figure 16). Le serveur correspond au cœur de la plateforme, il est chargé de traiter les requêtes de l'utilisateur, la gestion des données du véhicule et la génération d'applications multimédias Web. Du côté client, les applications peuvent être utilisées de deux manières : (1) la plus simple consiste en une application mobile permettant la consultation d'informations au travers d'une interface vocale ; et (2) la plus complexe est réservée aux utilisateurs qui téléversent les données des capteurs de leur véhicule vers le serveur pour qu'elles soient utilisables par d'autres utilisateurs.

Vitruvius ne gère qu'un nombre restreint de caractéristiques, dix en entrée, toutes associées à une même sortie. De plus, Vitruvius gère la combinatoire directement lors de la définition des règles, comme on peut le voir dans l'ensemble de règles données ci-dessus, avec des règles déjà conséquentes telles que les règles 3 et 5. Cela risque de poser problème lors d'un passage à l'échelle, avec une augmentation conséquente du nombre de règles d'adaptation et de caractéristiques à prendre en compte. Certains états au sein des règles d'adaptation ne sont d'ailleurs jamais utilisés au sein des règles, tels que l'état « a_many » des variables RepeatCount et HelpCount.

Concernant les variables linguistiques utilisées, présentées en Figure 15, certains éléments semblent erronés. Par exemple, la définition des variables completedActions et KeyWordsOutOfContextCount incluent chacune une valeur d'entrée (la valeur « 6 » pour les deux variables) pour laquelle aucun état n'est activé (ou autrement dit, tous les états ont un niveau d'activation à 0% pour cette valeur d'entrée).

Figure 15 : Variables linguistiques utilisées dans [Cueva-Fernandez et al. 2016]

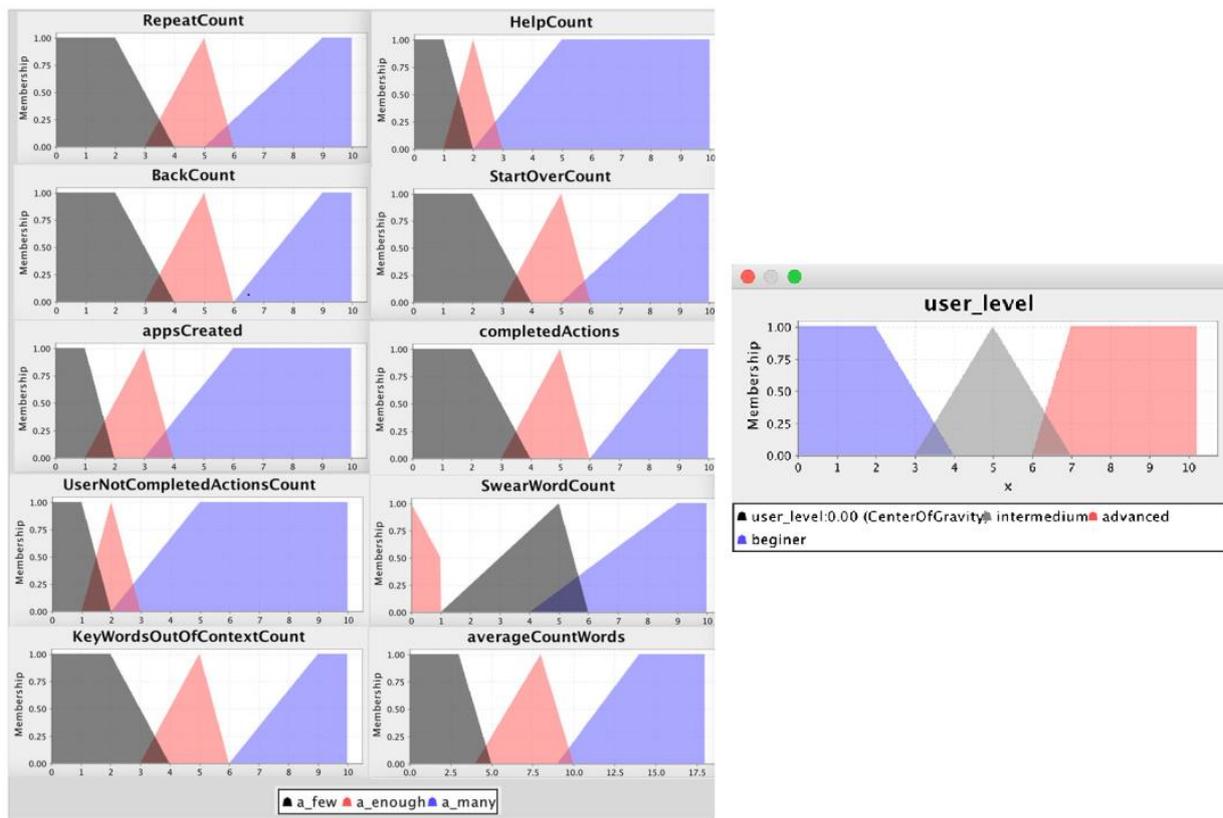
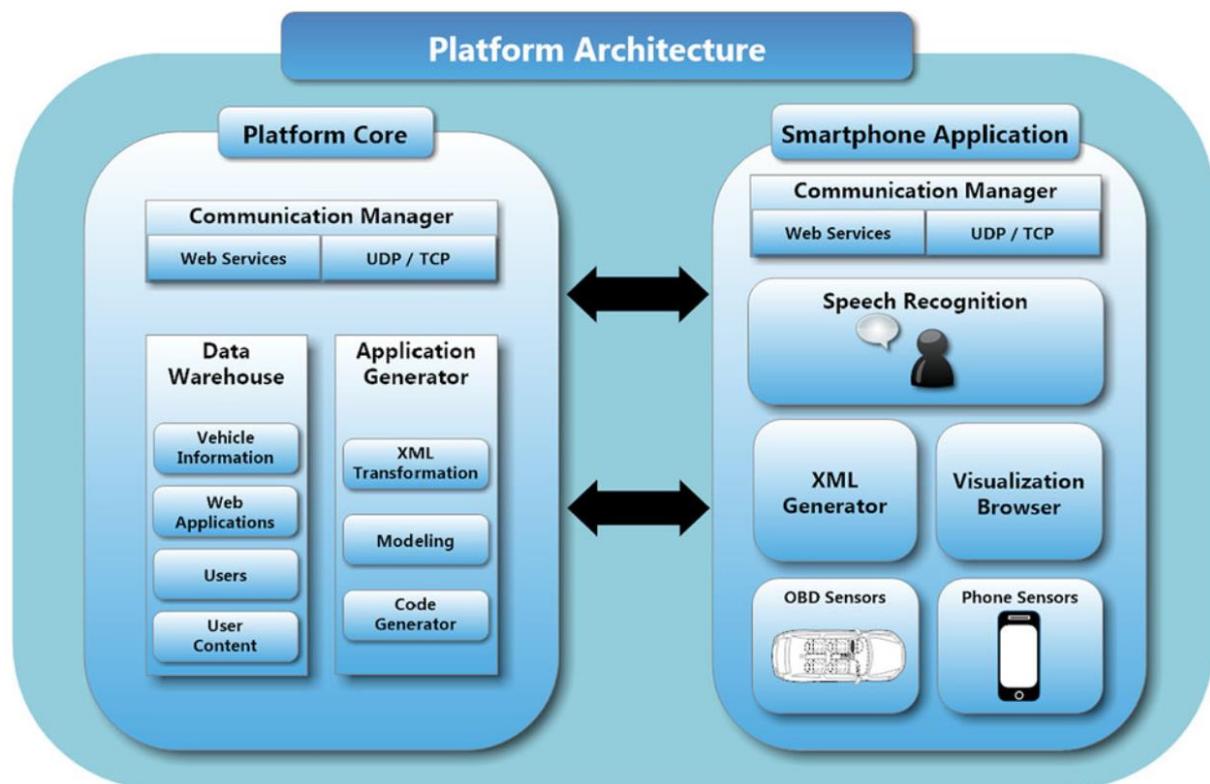


Figure 16 : Architecture de Vitruvius [Cueva-Fernandez et al. 2016]



Tous les travaux pour l'adaptation en logique floue prennent en compte l'incertitude des valeurs d'entrée, qui est un point fort intrinsèque de la logique floue. Cependant, les travaux d'adaptation des IHM en logique floue se focalisent généralement que sur des applications particulières, ils ne prennent en compte que peu de caractéristiques du contexte d'usage et n'ont généralement qu'un nombre restreint de règles d'adaptation associées dont ils gèrent la combinatoire directement lors de la définition des règles d'adaptation, ce qui, par extension, pourrait poser problème au niveau de la complexité des règles, dans le cas d'un passage à l'échelle.

4 Analyse

Notre analyse des travaux existants s'appuie sur des critères relatifs aux difficultés de réalisation d'un moteur d'adaptation des IHM. Il s'agit de : 1) l'étendue du contexte d'usage pris en compte en termes de couverture des trois aspects (utilisateur, plate-forme, environnement) ainsi que du nombre de caractéristiques considérées, notamment pour l'aspect utilisateur, 2) la gestion de l'incertitude sur les valeurs des caractéristiques du contexte d'usage, 3) la problématique de la complexité des règles dans le cas d'un passage à l'échelle et 4) la gestion de la combinatoire des règles d'adaptation.

Le Tableau 1 regroupe les différents travaux décrits dans ce chapitre et les évalue au regard de nos critères avec des boules de Harvey. Les critères considérés permettent de regrouper les différents travaux présentés dans les sous-sections précédentes.

Les travaux décrits en section 1 de ce chapitre [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017 ; Yang et al. 2007 ; Kolekar et al. 2018] se focalisent sur une amélioration de l'accessibilité des utilisateurs par le calcul des adaptations, sans toutefois prendre en compte un nombre important de caractéristiques. La prise en compte de l'étendue du contexte d'usage peut donc être considérée comme limitée. En matière d'adaptation, [Richards et al. 2004 ; Kurniawan et al. 2006 ; Ghiani et al. 2017] proposent une approche adaptable par les utilisateurs finaux, alors que [Yang et al. 2007 ; Kolekar et al. 2018] proposent une approche adaptative. Les approches adaptables ont le désavantage de requérir des actions de la part de l'utilisateur afin de pouvoir améliorer l'accessibilité de l'interface. Ceci peut poser problème notamment lorsqu'un utilisateur a des difficultés avec l'outil informatique ou des handicaps tels qu'une faible acuité visuelle ou une maladie de parkinson, compliquant l'interaction avec la plateforme. Les approches adaptatives évitent ces écueils, mais ont leurs propres points négatifs, par exemple si l'utilisateur est surpris et perturbé par la modification de l'interface ne résultant d'aucune action de sa part. Enfin, l'incertitude, la combinaison des règles et la problématique de complexité des règles ne sont que rarement mentionnées et ne sont pas traitées dans les travaux sur l'accessibilité.

Les travaux de la section 2, détaillant des approches d'adaptation des IHM sans logique floue, qu'ils soient basés sur Caméléon [Thevenin et al. 2003 ; Paternò et al. 2009 ; Akiki 2014 ; Miñón et al. 2016 ; Limbourg et al. 2004 ; Sottet et al. 2006 ; Aquino et al. 2009], ou basés sur les modèles mais non apparentés à Cameleon [Fink et al. 1996 ; Gajos et al. 2010 ; Yigitbas et al. 2020], ainsi que l'approche MyUI basée sur les patrons de conception [Peissner et al. 2012], et l'approche utilisant l'apprentissage automatique de [Genaro Motti et al. 2012] traitent tous d'adaptation dynamique en fonction d'un contexte d'usage plus ou moins étendu et comprenant un nombre

plus ou moins élevé de caractéristiques. En théorie, un contexte d'usage conséquent peut être pris en compte par ces travaux, mais en pratique, les auteurs ne présentent que des cas d'étude relativement restreints, d'où notre évaluation en « partiellement traité » pour la majorité d'entre eux. MyUI [Peissner et al. 2012] fait exception, proposant un nombre particulièrement important de caractéristiques, notamment en termes d'aspects utilisateur. Ces travaux, à l'exception de [Genaro Motti et al. 2012] détaillé ci-après et de [Peissner et al. 2012], s'appuient sur l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM). Cependant, selon [Akiki 2014], l'IDM ne parvient pas à produire des IHM adaptables jusqu'aux utilisateurs finaux. En effet, les approches IDM souffrent de plusieurs limites : (1) le paradigme, qui repose sur des modèles et des langages complexes, est difficile à apprendre [Marçal de Oliveira et al. 2015] et encore plus à maîtriser par les développeurs [Myers et al. 2000 ; Abrahao et al. 2017]. Les développeurs ont des difficultés à produire les « bons modèles à chaque niveau d'abstraction » [Lütjen et al. 2014]. De plus, l'IDM ne parvient pas non plus à garantir que le système résultant sera fonctionnel [Mussbacher et al. 2014] ; (2) lorsqu'ils adoptent une approche basée sur les modèles, les développeurs doivent produire tous les modèles et transformations nécessaires avant de générer les interfaces utilisateur, ce qui conduit à une sorte d'effet tunnel [Deuff et al. 2013] ; (3) la génération d'IHM par l'IDM n'est pas suffisamment mature pour couvrir tous les besoins des utilisateurs finaux, et notamment la capacité de basculer entre modalités [Coutaz 2010] ; (4) la convivialité des interfaces utilisateur générées par les approches IDM est généralement considérée comme faible [Meixner et al. 2011] ; de plus, les modèles étant complexes, leur utilisation est réservée à des experts, ce qui empêche la participation des utilisateurs finaux au processus de développement et bloque ainsi l'utilisation des approches centrées utilisateurs, recommandées pour assurer leur satisfaction [Akiki et al. 2014 ; Abrahao et al. 2017]. Par conséquent, il est difficile d'atteindre les attentes utilisateurs en termes de facilité d'utilisation, d'apprentissage, de satisfaction, d'attractivité, les affects ou les émotions induits – en bref, une bonne expérience utilisateur [Abrahao et al. 2017 ; ISO 9241-210:2010 ; Law et al. 2009]. De manière générale, les travaux sur l'adaptation au contexte ne se penchent pas sur l'incertitude, la combinaison des règles ou la problématique de complexité des règles.

Enfin, le travail de Genaro Motti [Genaro Motti et al. 2012] a les meilleures notes globales. L'apprentissage automatique permet en effet de gérer des données complexes, floues et nombreuses, permettant la prise en compte d'une incertitude des valeurs des caractéristiques, associées à un contexte d'usage conséquent et permettant une gestion automatique de la combinaison des règles durant le processus d'apprentissage. Toutefois, ces points ne sont pas vraiment abordés par les auteurs, d'où notre classification en « partiellement traité ». En particulier concernant l'étendue du contexte d'usage, l'utilisation de l'apprentissage automatique nécessite de disposer d'une base de connaissances importante – et donc difficile et/ou longue à acquérir – avant de pouvoir effectuer des adaptations correspondant effectivement aux besoins des utilisateurs.

Les travaux de [Papatheocharous et al. 2012 ; Soui et al. 2013 ; Cueva-Fernandez et al. 2016] utilisent la logique floue et prennent bien en compte l'incertitude des valeurs, naturellement gérée par la logique floue. Cependant, ces travaux n'utilisent qu'un nombre très restreint de caractéristiques, traduisant une prise en compte limitée de l'étendue du contexte d'usage. Les règles définies dans ces travaux combinent plusieurs conditions lors de leurs définitions, ce qui

peut poser problème en termes de complexité et de combinatoire des règles dans le cas d'une augmentation conséquente de la prise en compte du contexte d'usage, et donc du nombre de règles et de caractéristiques à gérer.

Afin de dépasser les limites des travaux actuels et de proposer une solution qui permette de gérer l'incertitude du contexte et de nombreuses caractéristiques et règles d'adaptation, nous nous intéressons à la réalisation d'un système d'adaptation des IHM basé sur la logique floue. Pour aller au-delà des propositions existantes en logique floue, nous montrerons son intérêt pour deux aspects peu abordés jusqu'alors qui sont la complexité des règles et la combinaison des règles d'adaptation.

5 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse de l'état de l'art regroupant trois catégories de travaux : (1) des travaux focalisés sur l'accessibilité des IHM pour les utilisateurs, (2) différentes approches d'adaptations des IHM, ainsi que (3) des travaux d'adaptation en logique floue. L'analyse de ces travaux a été faite au regard de nos différents verrous que sont l'étendue du contexte d'usage, l'incertitude des valeurs des caractéristiques, ainsi que la complexité et la combinatoire des règles. Les aspects d'incertitude des caractéristiques, de complexité et de combinatoire des règles ne sont généralement que peu mentionnés, et la plupart des travaux ne permettent de prendre en considération qu'un ou deux de nos verrous à la fois. Nous avons conclu par l'intérêt de proposer une approche basée sur la logique floue pour l'adaptation des IHM dans un contexte d'accessibilité.

Tableau 1. Comparaison des travaux de l'Etat de l'Art en fonction des critères ciblés

Approches	Étendue du contexte d'usage	Incertitude	Complexité	Combinaison des règles
Travaux centrés sur l'accessibilité				
Travaux adaptables				
[Richards et al. 2004]	●	○	○	○
[Kurniawan et al. 2006]	●	○	○	○
[Ghiani et al. 2017]	●	○	○	●
Travaux adaptatifs				
[Yang et al. 2007]	●	○	○	○
[Kolekar et al. 2018]	●	○	○	○
Approches d'adaptation des IHM sans logique floue				
Cadre de référence Caméléon et travaux associés				
Cameleon [Thevenin et al. 2003]	●	○	○	●
Maria [Paternò et al. 2009]	●	○	○	○
Cedar [Akiki 2014]	●	○	○	●
[Miñón et al. 2016]	●	○	○	●
[Limboung et al. 2004]	●	○	○	○
[Sottet et al. 2006]	●	○	○	○
[Aquino et al. 2009]	●	○	○	●
Approches d'adaptation basées sur les modèles				
[Fink et al. 1996]	●	○	○	○
Supple [Gajos et al. 2010]	●	○	○	○
[Yigitbas et al. 2020]	●	○	○	●
Autres approches d'adaptation				
[Genaro Motti et al. 2012]	●	●	●	●
MyUI [Peissner et al. 2012]	●	○	○	●
Approches d'adaptation des IHM avec logique floue				
[Papatheocharous et al. 2012]	○	●	○	●
[Soui et al. 2013]	○	●	○	●
[Cueva-Fernandez et al. 2016]	○	●	○	●

● : traité ; ● : partiellement traité ; ○ : non traité

Chapitre III

Le système Fuzzy4U : concepts, architecture et implémentation

III. Le système Fuzzy4U : concepts, architecture et implémentation

L'étude des travaux existants dans le chapitre précédent a montré que l'incertitude du contexte, la multiplicité des caractéristiques et règles d'adaptation étaient actuellement mal gérées lors de l'adaptation des interfaces, en particulier pour prendre en compte l'accessibilité. Pour aller au-delà des propositions existantes, nous proposons le système Fuzzy4U, comportant un moteur d'adaptation implémenté en logique floue. Nous montrerons comment cette solution permet de gérer l'incertitude des données contextuelles, ainsi que la complexité et la combinaison des règles d'adaptation. Le moteur d'adaptation de Fuzzy4U s'intègre dans une architecture plus globale pour l'adaptation des IHM. Ce chapitre commence par présenter les principes de la logique floue, avant de détailler l'architecture en question, ainsi que le moteur d'adaptation de Fuzzy4U. Il se termine par une présentation de règles d'accessibilité mises en œuvre au sein du moteur d'adaptation de sites web en logique floue et leur utilisation dans le prototype supportant l'exemple fil rouge de la thèse, celui de Bernard consultant le site d'un hôtel.

1 Introduction à la logique floue

Afin de faciliter la présentation de notre utilisation de la logique floue pour l'adaptation des IHM, cette section débute par une présentation de la logique booléenne qui est à la base de la logique floue. Elle présente ensuite les principes de la logique floue et son processus d'inférence.

1.1 La logique booléenne

La logique booléenne, ou algèbre de Boole du nom de son créateur, est un domaine d'étude large qui a de nombreuses applications dans le domaine de l'informatique ou encore dans la conception de circuits électroniques. Il a par exemple conduit à la définition des langages de requêtes dans les systèmes de gestion de base de données relationnelle. Dans le cadre de cette thèse, nous n'avons eu besoin que d'une partie de ce domaine, à savoir l'écriture de règles pouvant être évaluées à vrai ou faux, dans le but de déterminer si une adaptation de l'IHM est nécessaire.

La définition de ces règles en logique booléenne nécessite deux éléments : les variables booléennes ainsi qu'un ensemble d'opérateurs logiques. Une variable booléenne est une variable n'admettant que deux valeurs possibles : « vrai » et « faux » (ou respectivement « 1 » et « 0 ») et les opérateurs logiques utilisés sont la négation (NON), la conjonction (ET) et la disjonction (OU). Par exemple, pour représenter l'acuité visuelle, il est possible de définir que « vrai » et « faux » traduisent respectivement une bonne et une mauvaise acuité visuelle. Cependant, ces 2 états ne permettent pas une représentation de l'acuité visuelle suffisamment fine, car les utilisateurs peuvent avoir un grand nombre de différents niveaux d'acuité visuelle. Afin d'avoir une granularité suffisante, il est nécessaire de définir différents niveaux d'acuité visuelle comme différents états d'acuité visuelle : par exemple avec les états normal, faible, très faible et minimal. Similairement aux propositions de MyUI où l'acuité visuelle est définie sur le domaine $[0;4]$, on peut définir 4 variables : « visualAcuityNormal » pour l'état « normal » qui va ainsi être vrai pour une acuité visuelle normale et faux sur le reste du domaine ; « visualAcuityFaible » pour l'état « faible » ; « visualAcuityTresFaible » pour l'état « très faible » et « visualAcuityMinimale » pour « minimale ». On suppose qu'une seule de ces variables peut être vraie à un instant donné.

A partir de ces variables et des opérateurs de la logique booléenne, nous pouvons définir des règles booléennes en exprimant des conditions simples (« si a ») ou complexes (« si (a ET (b OU c)) »). Par exemple, on peut avoir une règle « si visualAcuityFaible = true » qui définit la condition si l'acuité visuelle est faible.

Cependant, des limites théoriques existent avec l'utilisation de la logique booléenne. En premier lieu, les variables peuvent avoir besoin d'un degré d'incertitude ou d'imprécision [Dernoncourt 2011]. Dernoncourt définit l'incertitude comme désignant « les connaissances dont la validité est sujette à question » et l'imprécision comme désignant « les connaissances qui ne sont pas perçues ou définies nettement ». Dernoncourt donne les deux exemples suivants pour illustrer ces deux facettes : 1) « Si nous savons qu'une personne s'est cognée la tête sur un plafond, nous devinons qu'il est probable qu'elle soit très grande », cependant cette affirmation possède un certain degré d'incertitude étant donné que le plafond était peut-être particulièrement bas à un endroit donné ; et 2) « Au lieu de dire qu'une personne mesure 2 mètres et 3 centimètres, nous disons usuellement que cette personne est très grande », bien que cette affirmation soit imprécise, ne donnant pas sa taille précise. Dans la suite de cette thèse, nous utiliserons le terme d'incertitude pour regrouper ces deux cas de figure : l'incertitude et l'imprécision des valeurs.

De par sa nature même, la logique booléenne ne permet pas une gestion de l'incertitude des valeurs, une variable étant soit vraie, soit fausse. Ceci entraîne aussi des effets de seuils [Dernoncourt 2011] lors du passage d'un état à un autre quand on s'intéresse à des variables qui représentent des états d'un même concept. Ainsi, une variable décrivant la taille d'une personne peut par exemple être découpée en cinq états tels que {très petit, petit, moyen, grand, très grand}, avec un seuil entre les états « grand » et « très grand » fixé à 190cm. Dans le cas de la logique booléenne, une personne mesurant 189.9cm se verra ainsi classée dans la catégorie « grand » alors qu'une personne mesurant 190.0cm sera classée dans la catégorie « très grand », alors que la différence entre les deux tailles est extrêmement faible. Dans le but de faire face à ces limites, la logique floue a été proposée [Zadeh 1965, McKone 2005, Bockstaller 2017].

1.2 La logique floue

La logique floue peut être vue comme une extension de la logique booléenne classique qui permet de prendre en compte l'incertitude et l'imprécision des valeurs d'entrée : alors que la logique classique ne considère que deux valeurs (« vrai » et « faux »), la logique floue considère un ensemble infini de valeurs réelles entre 0 (faux) et 1 (vrai). Cette logique a été introduite par Zadeh [Zadeh 1965] afin de se rapprocher du raisonnement humain et d'éviter les effets de seuil des opérateurs de comparaison. La logique floue permet également d'écrire des règles plus proches du langage naturel, au sens où elle est capable de traiter certaines ambiguïtés du langage naturel [Hersh et al. 1976].

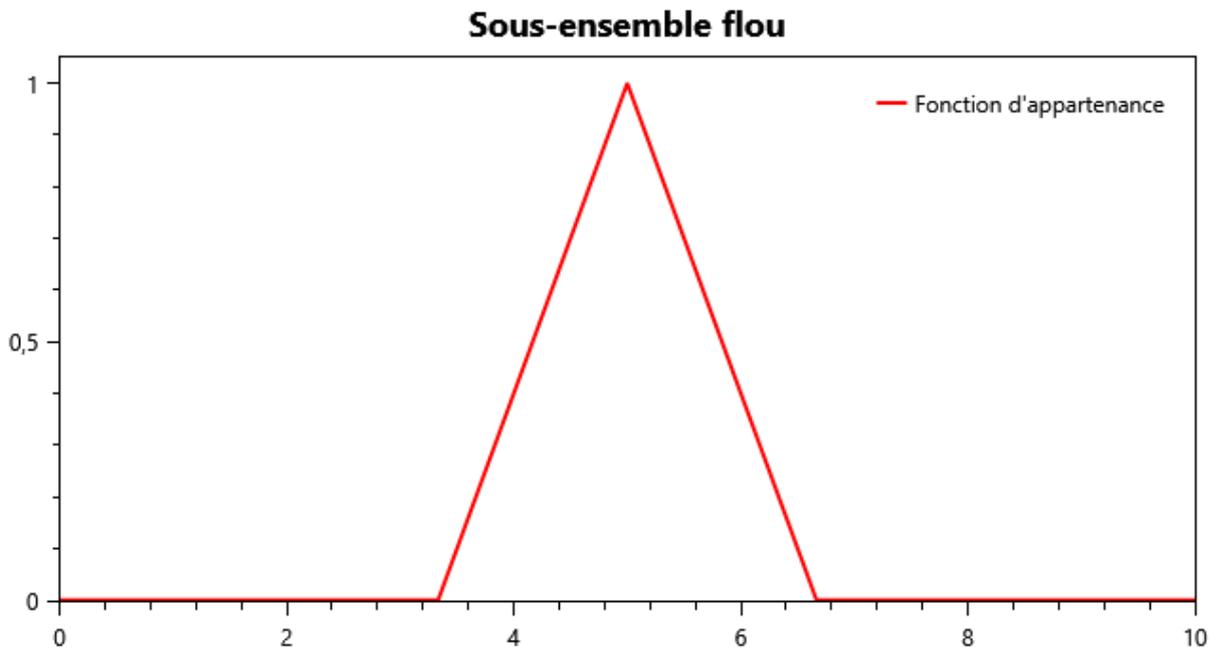
Elle s'appuie sur les concepts de sous-ensemble flou et de variable linguistique que nous décrivons dans la sous-section suivante.

1.3 Les concepts de sous-ensemble flou et de variable linguistique

La logique floue est basée sur le concept de sous-ensemble flou. Soit X l'univers du discours, c'est-à-dire un ensemble d'objets dénotés x . Un sous-ensemble flou A de X est totalement

caractérisé par une fonction appelée « fonction d'appartenance ». Cette fonction indique à quel point un objet x appartient à X , alors que dans les ensembles « crisp » (le terme « crisp » se définit par opposition à flou), les objets appartiennent ou non à l'ensemble. Les sous-ensembles flous sont donc utiles pour représenter l'imprécision des entrées ou l'incertitude liée aux connaissances mises en œuvre. La Figure 17 représente un sous-ensemble flou défini sur $[0;10]$ avec une fonction d'appartenance triangulaire qui représente « approximativement 5 ».

Figure 17 : Exemple de sous-ensemble flou défini avec une courbe triangulaire

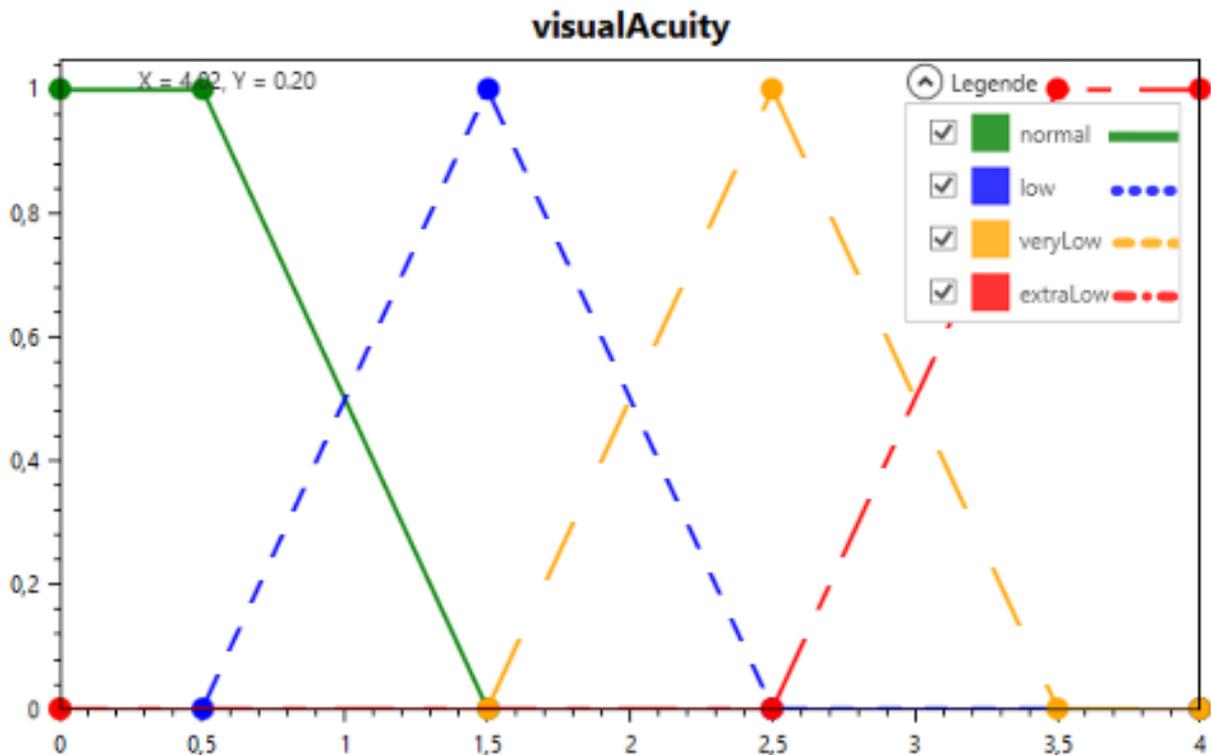


Les fonctions d'appartenance peuvent prendre différentes formes : triangulaire, trapézoïdale, Gaussienne, en cloche, etc. Toutefois, en termes d'applications pratiques, plusieurs travaux recommandent en particulier l'utilisation de courbes triangulaires et trapézoïdales [Pedrycz 1994 ; Barua et al. 2014]. A noter que les courbes triangulaires sont un cas particulier des courbes trapézoïdales, où deux points différents sur une courbe trapézoïdale sont regroupés sur une courbe triangulaire. Dans le cadre de cette thèse, nous avons ainsi utilisé ces types de courbes.

Le concept suivant dérive des sous-ensembles flous et s'appelle « variable linguistique » [Zadeh 1975], qui est un triplet (V, XV, TV) défini par : 1) V , son nom ; 2) XV , le domaine sur lequel elle est définie ; 3) TV , une collection finie de sous-ensembles flous appelés « termes », qui qualifient V et qui sont nommés.

La Figure 18 représente une variable linguistique appelée « Acuité visuelle » définie sur le domaine $[0;4]$ (similairement aux propositions de MyUI [Peissner et al. 2012]), composée de quatre termes (« Normal », « Faible », « Très faible » et « Minimal ») et leurs fonctions d'appartenance associées.

Figure 18 : Exemple de variable linguistique (Acuité visuelle)



1.4 Utilisation de règles floues pour modéliser les connaissances

Les définitions précédentes sont utilisées pour définir les connaissances d'experts humains dans un ensemble de règles. Ces règles sont basées sur une combinaison de propositions floues élémentaires. Une proposition floue élémentaire est la définition de « V est A » à partir d'une variable linguistique (V, X_v, T_v) où A est un terme de T_v . Ainsi, si l'on reprend la variable linguistique « Acuité visuelle » de la Figure 18, une proposition floue pourrait être « Acuité visuelle est faible ». Cette proposition est évaluée à partir de la fonction d'appartenance du terme impliqué pour une acuité visuelle donnée. Cette valeur est floue et donc comprise entre [0, 1] contrairement à la logique classique dans laquelle l'évaluation d'une proposition est soit vraie (1) soit fausse (0).

Une expression floue est une composition de propositions floues élémentaires ou d'autres expressions à l'aide d'opérateurs logiques : négation (non), conjonction (et) et disjonction (ou), le ou exclusif n'étant pas géré.

Les propositions floues sont des cas particuliers d'expressions floues. Par exemple, soit deux propositions floues « V est A » utilisant (V, X_v, T_v) et « W est B » utilisant (W, X_w, T_w) . Alors, « V est A et W est B », « V est A ou non W est B » sont des expressions floues. La valeur de vérité des expressions floues est obtenue en appliquant les opérateurs sur les valeurs de vérité de leurs opérandes.

Ces expressions sont donc utilisées pour exprimer les connaissances des experts humains dans les règles floues. Une règle floue est composée d'une prémisse (ou antécédent) et d'une conclusion (ou conséquence) et est de la forme « SI prémisse ALORS conclusion ». Une prémisse est une expression floue alors qu'une conclusion est une déclaration floue de nature différente. Une conclusion peut être une proposition floue. Dans ce cas, la règle est de la forme : « SI Acuité

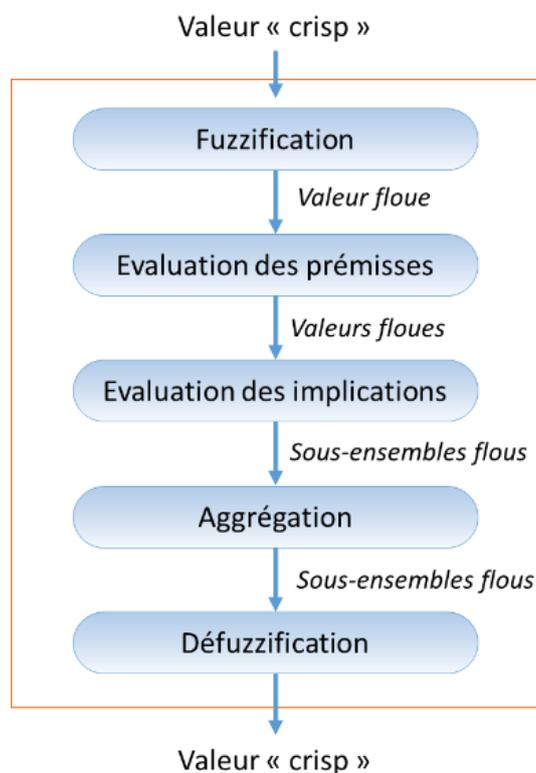
visuelle est faible ALORS la taille de police est élevée. » Une conclusion peut être une fonction mathématique des entrées de la prémisse. Ces règles sont dites de la forme Takagi-Sugeno et sont de la forme « SI acuité visuelle est faible ALORS taille_de_police=f(acuité visuelle) ».

Ainsi les règles associent les entrées du système aux sorties à l'aide d'une implication floue (dénotée par ALORS).

1.5 Inférence floue

Le formalisme utilisé pour représenter les connaissances ayant été présenté, nous pouvons nous intéresser au processus d'inférence, c'est-à-dire le calcul des sorties. En effet, dans la section précédente nous avons vu comment une règle fonctionnait ; nous allons à présent voir comment les règles fonctionnent ensemble. Il existe deux types d'inférence en logique floue en fonction du type de règle utilisé : l'inférence de Mamdani et l'inférence de Takagi-Sugeno. Dans les deux cas, les règles sont évaluées individuellement et agrégées ensuite en utilisant leur activation pour pondérer leurs sorties respectives et obtenir ainsi la valeur de sortie finale. De par la nature de leurs conclusions, les systèmes de Mamdani sont plus interprétables et l'écriture des règles est plus intuitive, contrairement aux systèmes de Sugeno qui sont plus appropriés à l'apprentissage automatique. Nos règles provenant d'une expertise, nous avons naturellement choisi un système de Mamdani [Bouchon-Meunier 2007] dont le processus d'inférence est décrit ci-après et résumé dans la Figure 19.

Figure 19 : Vue d'ensemble de l'inférence de Mamdani



La première étape consiste à évaluer chacune des propositions floues élémentaires présentes dans les prémisses des règles : cette étape est appelée fuzzification. Elle prend les valeurs « crisp » des entrées et associe une valeur floue en fonction des fonctions d'appartenance des termes. Par exemple, en utilisant la variable linguistique « Acuité visuelle » de la Figure 18 et le terme

« normal », pour une acuité visuelle de 0, « acuité visuelle est normale » est évaluée à 1. Pour une acuité visuelle de 1, « acuité visuelle est normale » et « acuité visuelle est faible » sont chacun évalués à 0.5.

Les prémisses sont ensuite calculées. La valeur des prémisses devient alors la valeur d'activation de la règle. Par exemple, si on prend les opérateurs de Zadeh, pour une acuité visuelle de 0, la valeur de la prémisse « acuité visuelle est normale ou acuité visuelle est faible » est $\max(1,0)=1$.

La fonction d'implication est ensuite appliquée à la conclusion des règles. Le résultat est un sous-ensemble flou qui peut être interprété comme une distribution des valeurs pour les sorties. La Figure 20 montre le sous-ensemble flou résultant de l'application d'une implication minimum lorsque la règle est activée à 0,75.

Les sous-ensembles flous des différentes règles concernant la même sortie sont ensuite agrégés par une méthode particulière, comme par exemple la fonction maximum (Figure 21).

Enfin, le sous-ensemble flou de chaque sortie est transformé en valeur « crisp » : cette étape est appelée défuzzification. Il existe différentes fonctions de défuzzification. La plus connue consiste à calculer le barycentre de l'aire sous la courbe agrégée (Figure 21).

Figure 20 : Résultat de l'implication

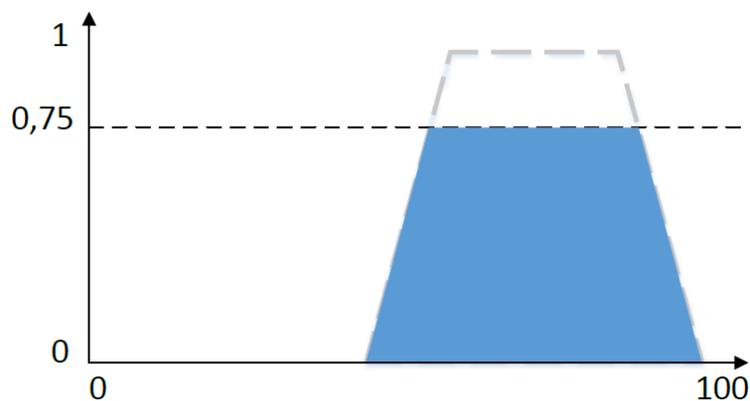
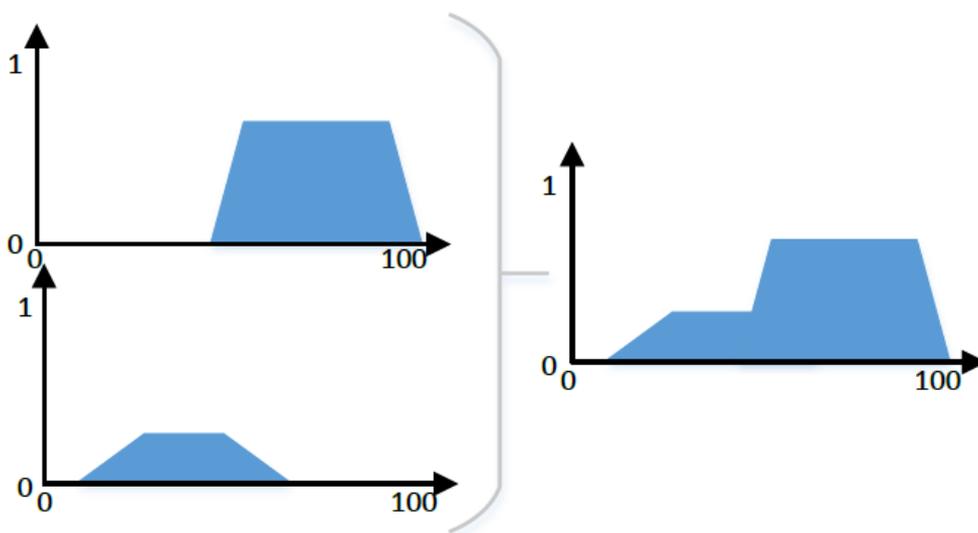


Figure 21 : Application de l'agrégation maximum à deux sous-ensembles flous



Dans le cas de ces travaux, nous avons choisi de remplacer l'étape d'agrégation et de défuzzification par une étape unique qui consiste à calculer le barycentre de chacune des sorties individuellement et de les pondérer entre eux en fonction de l'aire obtenue par l'implication floue. Ce changement a été effectué car il a pu être adapté aux domaines discrets ordonnés : la valeur la plus proche de la somme pondérée des barycentres est alors utilisée comme valeur finale. Cela permet d'assurer une transition progressive entre les différentes valeurs d'une sortie, même dans le cas de domaines discrets ordonnés.

Par la suite, nous montrons les apports de la logique floue au sein d'un système d'adaptation des IHM, en particulier pour l'accessibilité. Nous commençons par présenter l'architecture de ce système et l'intégration de la logique floue dans son moteur d'adaptation.

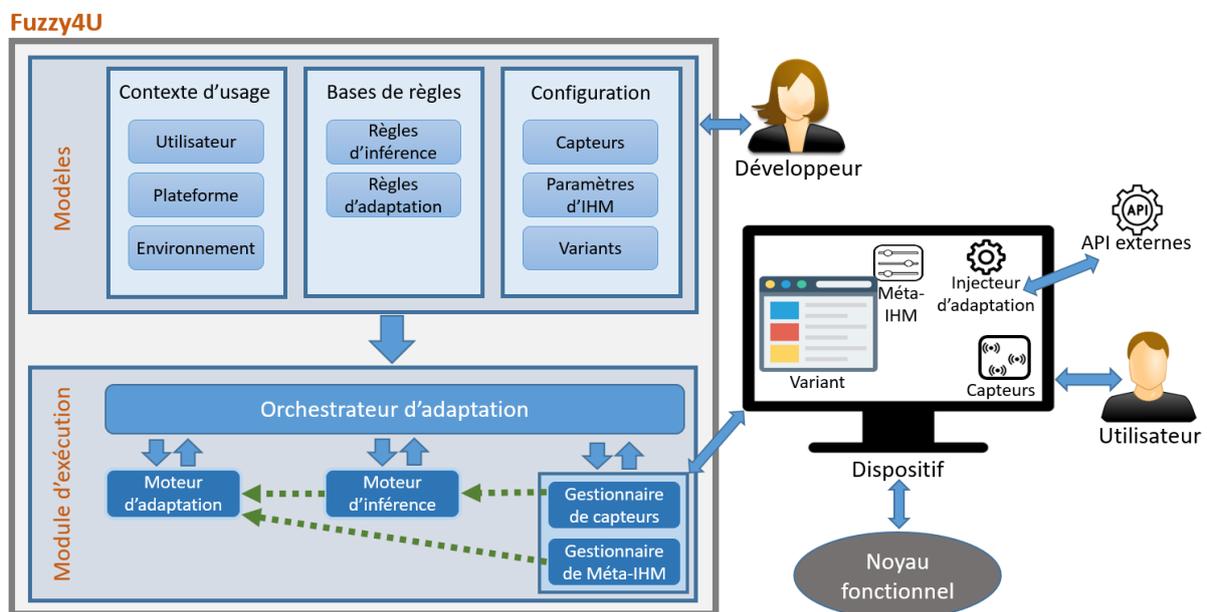
2 Le système Fuzzy4U : architecture logicielle et implémentation

Notre système d'adaptation des interfaces s'appuie sur une architecture logicielle qui a été implémentée pour des interfaces web. Il s'appuie en particulier sur un moteur d'adaptation en logique floue que nous décrirons. Nous montrerons aussi comment l'utiliser avec la définition de règles pour l'accessibilité.

2.1 L'architecture logicielle de Fuzzy4U

Le système Fuzzy4U s'appuie sur deux éléments principaux : un ensemble de modèles, ainsi qu'un module d'exécution (Figure 22).

Figure 22 : Architecture de Fuzzy4U



La partie « Modèles » exprime les choix de conception effectués par le développeur d'IHM. Elle est subdivisée en trois catégories, avec : (1) les modèles du contexte d'usage (utilisateur, plateforme et environnement), (2) des bases de règles (règles d'inférence et d'adaptation), et (3) de configuration (modèles de capteurs, de paramètres d'IHM, et de variants).

Dans la première catégorie, les modèles du contexte d'usage, le modèle utilisateur détaille les caractéristiques propres aux utilisateurs, telles que leurs caractéristiques démographiques (âge,

genre), leurs perceptions (acuité visuelle, daltonisme, ...), leurs capacités physiques (précision des mains, tremblements, ...) ou leurs capacités cognitives (expérience avec l'informatique, niveau d'attention, dyslexie, ...). Le modèle de plateforme liste les différentes plateformes utilisables et leurs caractéristiques (OS, taille d'écran, liste de capteurs existants, ...); et le modèle d'environnement détaille les caractéristiques des environnements dans lesquels les utilisateurs interagissent avec le système (luminosité ambiante, bruit ambiant, ...).

Dans la seconde catégorie, les règles d'inférence et d'adaptation sont une description de toutes les règles que les moteurs d'inférence et d'adaptation, décrits ci-après, vont respectivement utiliser.

Enfin, dans la troisième et dernière catégorie, les modèles de configuration, le modèle de capteurs décrit les capteurs utilisables et le type de données renvoyé. Par exemple, le capteur « caméra » renvoie une valeur de type « Image ».

Le modèle de paramètres d'IHM liste les paramètres de présentation possibles pour les variants de l'IHM. Un paramètre d'IHM est une variable définissant un comportement ou un rendu au sein de l'IHM, dont la valeur est calculée par le moteur d'adaptation. Cette valeur est le plus souvent discrète (ex : le type de liste à puces peut être "classique" ou "ordonné", la présence d'animation peut être "vraie", "fausse"), pour ramener l'application de l'adaptation à un nombre limité de cas mais elle peut aussi être continue (ex : une taille de police de 12.4px).

Le modèle de variants décrit les variants d'IHM [Céret et al. 2016] disponibles. En raison de limites techniques – par exemple, la difficulté à anticiper la taille qu'occuperaient un espace de travail ou des interacteurs, l'organisation spatiale de l'IHM est difficile à modifier dynamiquement de façon importante. Lorsqu'une modification conséquente doit être envisagée, nous nous appuyons ainsi sur plusieurs versions de l'organisation spatiale de l'IHM, chaque version étant nommée un variant. Un variant d'IHM est une variation des structures de l'IHM créée pour un contexte d'usage spécifique (voir Figure 23 et Figure 24 pour deux variants différents d'une même page : respectivement un variant PC et un variant smartphone). Il permet de prendre en charge la réorganisation spatiale d'une IHM en fonction d'un ensemble de contraintes (taille d'écran, taille de police, ...).

Figure 23 : Page de localisation de l'hôtel (non adaptée - variant PC)

Le Royal
HOTEL · LYON

ACCUEIL CHAMBRES & SUITES RESTAURANT & BAR PETIT DEJEUNER SERVICES LOCALISATION



LOCALISATION

Retrouvez-nous dans le centre ville de Lyon

Transports et accès

Station de métro :
Ligne D - Station BELLECOUR
Ligne A - Station BELLECOUR

Bus :
C5-C9-C10-C12 - BELLECOUR
10-14-15-35-88 - BELLECOUR

Gare Ferroviaire :
LA PART DIEU (5km / 3.11mi)
PERRACHE (1km / 0.63 mi)

Aéroport :
Lyon Saint Exupery (28km / 17.40 mi)
Accès par taxi ou Train Rhône Express arrêt Gare Part Dieu

Sortie Autoroute :
Direction Lyon- Centre Ville- Place Bellecour

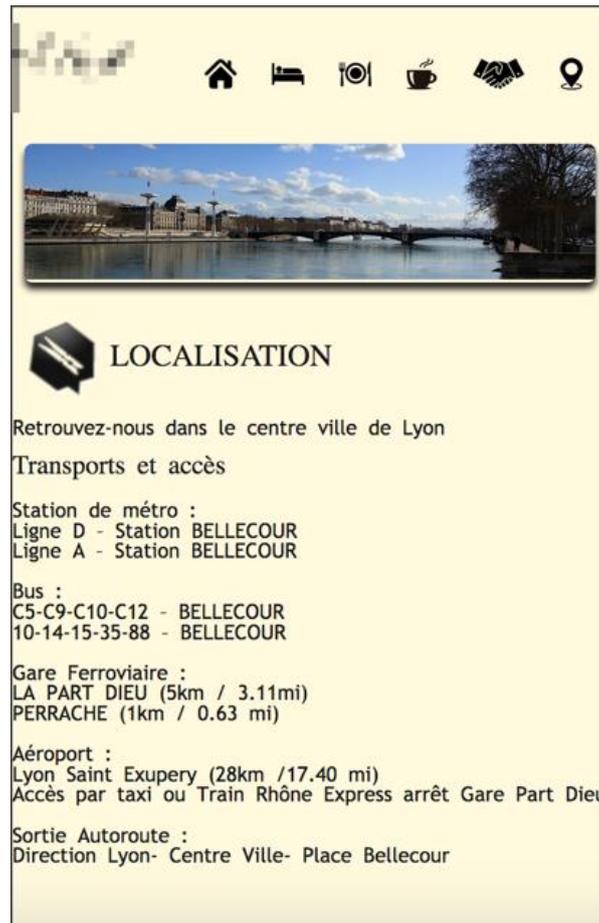


- Only Lyon
- Mentions légales
- Contactez-nous
- Notre blog

f t g+



Figure 24 : Page de localisation de l'hôtel (non adaptée - variant smartphone)

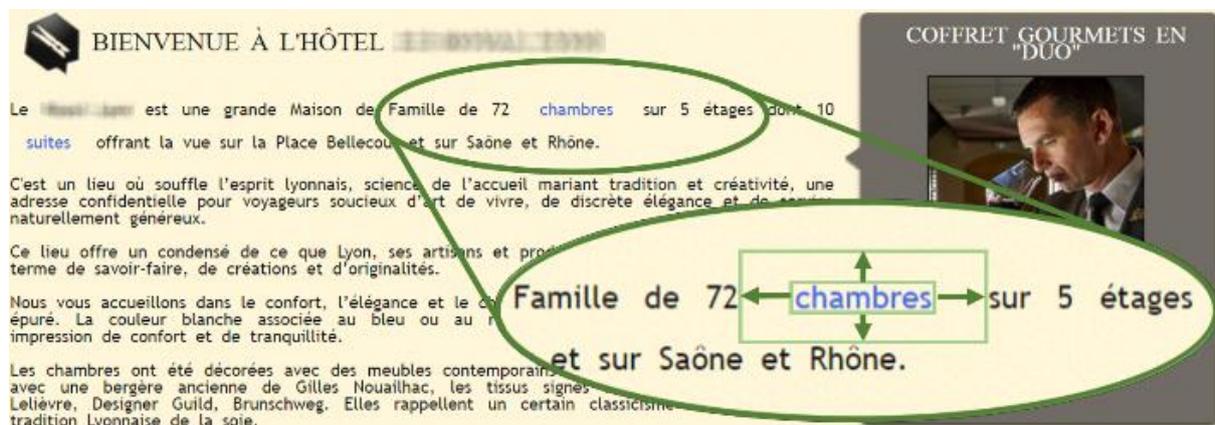


Dans la partie « Module d'exécution », le gestionnaire de capteurs a pour rôle de connaître les dispositifs disponibles, leurs configurations et leurs capteurs (par exemple un téléphone, tournant sous Android, ayant une taille d'écran de 2220x1080 pixels, et disposant d'un accéléromètre et d'une caméra frontale).

Le moteur d'inférence est chargé de transformer des valeurs inexploitable en valeurs exploitables grâce aux règles d'inférence. En effet, certaines données peuvent être dans un format difficilement exploitable pour en déduire des adaptations. Par exemple, une image prise par la caméra de l'utilisateur n'est pas directement exploitable, il faut évaluer la luminosité moyenne de ses pixels pour ensuite estimer la luminosité ambiante et, par exemple, inférer que l'environnement de l'utilisateur est très éclairé et assigner la valeur « plein soleil » à la variable de luminosité ambiante du modèle de l'environnement. On peut aussi enchaîner les inférences, chacune dépendant du résultat de la ou des précédentes. Ainsi, on peut surveiller le nombre de clics « valides » effectués sur des interacteurs (liens, boutons, listes) et le nombre de clics « invalides » (à côté de tout interacteur). Ici, ce n'est pas l'événement « clic » en soi qui suffit, il faut d'abord une première inférence pour déterminer si c'est un clic « valide » ou « invalide » avant de l'ajouter au bon compteur (seconde inférence) et ainsi savoir qu'il y a eu 130 clics sur un interacteur et 212 dans une zone vide. On peut alors en déduire (troisième inférence) que l'utilisateur a probablement des difficultés pour manipuler aisément son dispositif et affecter la valeur « très faible » à l'attribut « précision des mains » du modèle de l'utilisateur.

Le moteur d'adaptation a pour rôle de (a) sélectionner un variant d'IHM correspondant aux contraintes spatiales (taille d'écran) puis (b) de calculer les valeurs des paramètres d'IHM (couleurs, police de caractères...) et (c) de mettre à jour les modèles de variant et de paramètres d'IHM avec les nouvelles valeurs. Pour réaliser ces trois tâches, le moteur d'adaptation commence par charger le modèle des variants. Dans le cas d'une adaptation basée sur la logique booléenne, il traduit ensuite les modèles de règles d'adaptation booléenne en règles exécutables ou il fait appel au moteur en logique floue. Dans les deux cas, le moteur se base sur les données connues (déclarées ou inférées) du contexte d'usage. Ainsi, si la précision de la main de l'utilisateur est faible, le moteur d'adaptation calcule que l'espace pris en compte pour le clic sur les interacteurs devra augmenter afin d'améliorer l'utilisabilité de l'interface pour cet utilisateur spécifique (voir Figure 25), par exemple en affectant la valeur highCorrection au paramètre clickCorrection.

Figure 25 : Augmentation de la zone de clic des interacteurs



Le gestionnaire de méta-IHM permet d'insérer une instance de méta-IHM [Coutaz 2006] dans l'IHM générée. Définie par J. Coutaz comme « un système interactif dont l'ensemble des fonctions est nécessaire et suffisant pour contrôler et évaluer l'état d'un espace ambiant interactif », la méta-IHM permet à l'utilisateur de déclarer des caractéristiques propres à son contexte d'usage (précision des mains, dyslexie, luminosité, ... Voir Figure 26) pour contrôler l'adaptation ou de modifier directement les caractéristiques de l'IHM (taille de police ou des boutons, espacement des mots, ... Voir Figure 27). Par défaut, toutes les caractéristiques sont modifiables (cadenas vert), et leurs valeurs initiales correspondent aux précédentes données connues pour cet utilisateur ou aux dernières données inférées. Lorsque l'utilisateur choisit de déclarer lui-même une caractéristique, celle-ci est verrouillée (cadenas rouge). Ainsi, la méta-IHM permet de laisser à l'utilisateur le contrôle final sur le système d'adaptation, notamment dans le cas où l'adaptation calculée ne lui convient pas. Par exemple lorsqu'un utilisateur enlève ses lunettes, il est inféré que cela entraîne une baisse de son acuité visuelle et donc une augmentation de la taille de police ; cependant, le système n'avait pas détecté qu'il s'agissait de lunettes de repos, sans impact sur son acuité visuelle, et non de lunettes de vues. Dernièrement, le gestionnaire de méta-IHM est chargé de faire transiter les données modifiées par l'utilisateur au sein de la méta-IHM vers le moteur d'inférence, qui affecte la valeur sélectionnée à un attribut du modèle de contexte (avec un indicateur signalant que cette valeur ne pourra plus être remplacée par une valeur inférée jusqu'à ce que l'utilisateur « libère » cet attribut à l'aide des icônes « verrou » sur la figure 10). La modification d'un attribut entraîne la mise à jour du modèle concerné, ce qui entraîne un nouveau

calcul de la part du moteur d'adaptation puis, si besoin, l'injecteur d'adaptation permet d'actualiser l'IHM.

L'orchestrateur d'adaptation a pour rôle de charger les modèles du contexte d'usage (vierge pour un nouvel utilisateur ou pré-rempli avec les valeurs d'attributs précédemment mémorisées) et de gérer concrètement la communication entre les gestionnaires de capteurs et de méta-IHM ainsi que les moteurs d'inférence et d'adaptation, et l'injecteur d'adaptation. Cette structure permet de garantir l'indépendance entre les différents modules, aucun d'eux ne connaissant les autres : chacun s'adresse et est activé uniquement par l'orchestrateur. Une fonctionnalité prévue mais pas encore implémentée est de donner la possibilité à l'orchestrateur d'adaptation d'exclure certaines données captées ou inférées en fonction de la configuration locale. Ainsi, il pourrait par exemple décider d'exclure les données recueillies par des capteurs s'il a été détecté que l'utilisateur n'est actuellement pas devant son dispositif, par le biais de la caméra.

Enfin, l'injecteur d'adaptation est chargé de se baser sur les paramètres d'IHM calculés pour mettre à jour l'interface. Dans le cas des variables discrètes, nous avons opté pour une solution basée sur les règles CSS. Ainsi, nous créons une règle 'conditionnelle', par exemple `body[animations="true"]` pour exprimer que la règle s'applique au corps de la page si et seulement si celui-ci a un attribut « animations » valant « true ». L'injecteur modifie alors, en fonction de la valeur reçue, les attributs associés à l'élément `body`. Selon les cas, on peut alternativement créer des règles conditionnées par les classes de l'élément `body` (`body.showAnimations` ou `body.hideAnimations`), la seule différence que nous avons notée entre les deux solutions étant la facilité de les programmer (changer la valeur d'un attribut est plus simple que supprimer toutes les anciennes classes correspondant à d'autres valeurs que la valeur courante et ajouter la classe attendue). Pour les variables continues, la solution doit être trouvée de façon ad-hoc. Par exemple, modifier la taille de police sur toute la page peut se faire en manipulant directement la valeur de la directive `font-size` appliquée à la balise `body`, ce qui se transmet à tous les éléments de la page par héritage. Mais si un cas d'étude nécessitait de n'appliquer les modifications qu'à certains éléments de la page (notre cas d'étude ne nous a pas amenés à devoir traiter cette situation), il faudrait trouver une approche plus satisfaisante (par exemple, en modifiant dynamiquement les directives CSS dans le navigateur de l'utilisateur). L'injecteur d'adaptation est aussi chargé d'appeler des API externes lorsque cela s'avère utile, telle qu'une API de synthèse de texte, permettant de synthétiser le texte en fonction du niveau de verbosité du texte, ou encore une API d'analyse d'image, permettant par exemple d'analyser une photo prise par la webcam de l'utilisateur et d'en modifier les couleurs en fonction du type de daltonisme de l'utilisateur.

Figure 26 : La méta-IHM de Fuzzy4U – Onglet Caractéristiques

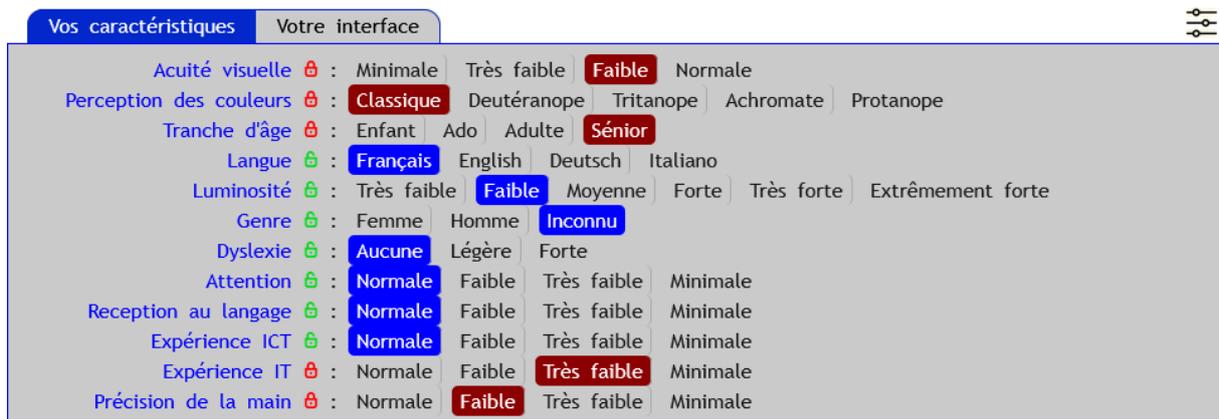
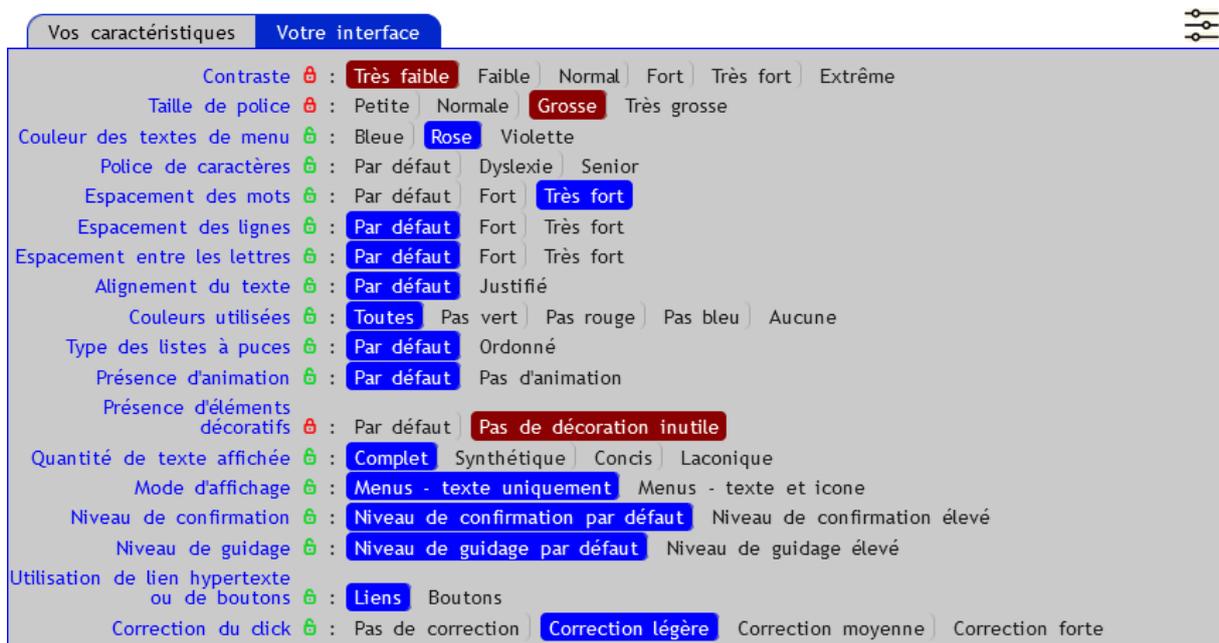
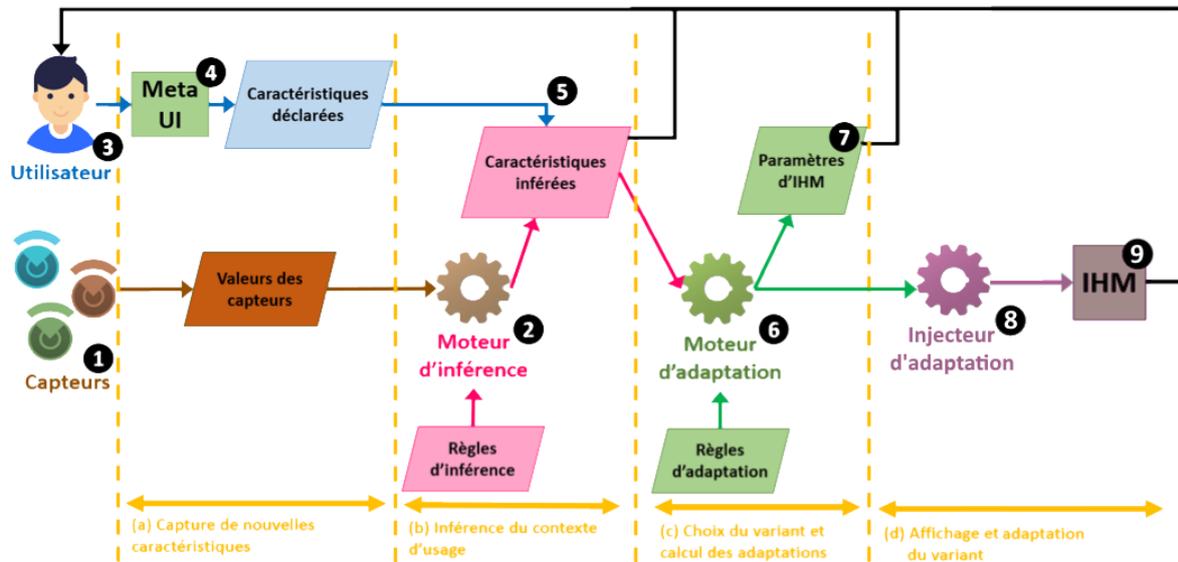


Figure 27 : La méta-IHM de Fuzzy4U – Onglet Interface



Nous illustrons le fonctionnement de Fuzzy4U au travers de l'exemple fil rouge, en présentant un exemple de cycle d'adaptation pour notre utilisateur, Bernard (Figure 28). Cette présentation omet l'orchestrateur, dont le rôle est ici peu intéressant, puisqu'il ne sert qu'à activer les modules les uns après les autres. Tout d'abord, les données recueillies par les capteurs ① présents sur le dispositif de Bernard servent d'entrées initiales. Une première donnée peut être le nombre de clics valides et invalides (respectivement sur un interacteur, ou à côté de l'un d'eux), gardé en mémoire grâce à un historique ; et une deuxième entrée en provenance du capteur de luminosité ambiante, qui détecte 50.000 lux. Le moteur d'inférence ②, selon sa base de règles, transforme les clics en « précision de la main : très faible », ainsi que les « 50.000 lux » en « luminosité : plein soleil ».

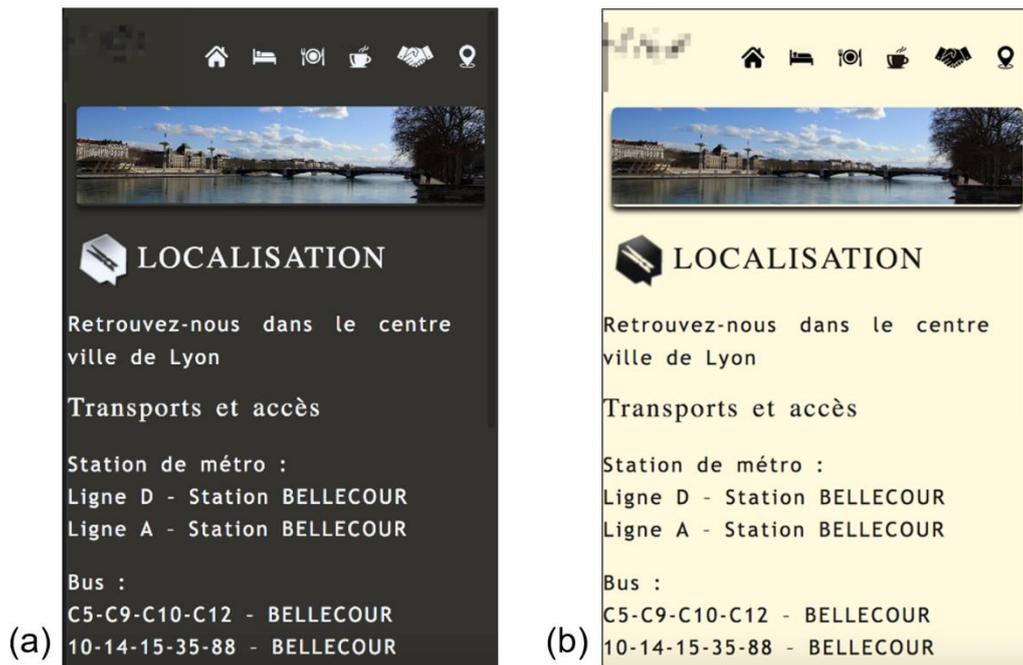
Figure 28 : Un exemple de cycle d'adaptation



Cependant, l'utilisateur, Bernard (3), a pu utiliser la méta-UI (4) pour déclarer certaines caractéristiques, telles que la précision des mains qu'il a définie comme étant « bonne ». Etant donné qu'une caractéristique a été à la fois inférée (« très faible ») et déclarée (« bonne »), la valeur déclarée prend la priorité (5), et la précision des mains connue par le système pour Bernard sera donc « bonne ».

Ces deux caractéristiques (bonne précision de la main et luminosité plein soleil) sont ensuite transmises au moteur d'adaptation (6) qui sélectionne un variant adapté (dans cet exemple, un variant smartphone, le variant choisi étant celui qui a la distance minimum entre son contexte attendu – il est prévu pour une taille d'écran de 600x200 – et le contexte courant – par exemple un écran de 650x230). Le moteur d'adaptation calcule ensuite de nouveaux paramètres d'IHM (7) en fonction du contexte d'usage courant, et transmet les résultats obtenus à l'injecteur d'adaptation (8) qui met à jour l'IHM (9). En l'occurrence, une bonne précision des mains n'implique pas de modification de l'IHM, mais la forte luminosité ambiante entraîne la modification de deux paramètres d'IHM par le moteur d'adaptation, une augmentation du contraste et de la luminosité de l'IHM dans le but de conserver une lisibilité suffisante. L'injecteur d'adaptation se base ensuite sur ces paramètres afin de mettre à jour l'IHM (voir Figure 29 : version (a) pour une IHM au contraste adapté et version (b) pour une IHM non adaptée).

Figure 29 : Page de localisation de l'hôtel, adaptée à Bernard, avec un variant smartphone, et pour un environnement sombre (a) et un environnement lumineux (b)



2.2 Implémentation du système Fuzzy4U

2.2.1 Composants existants

L'architecture logicielle présentée précédemment a été mise en œuvre avec des technologies web. Elle repose sur NodeJS, permettant d'exécuter du JavaScript aussi bien côté serveur que côté client. La totalité des modules sont donc écrits en JavaScript. Les différents modèles utilisés, tels que les différents modèles de contexte ou la base de règles d'inférence, sont stockés dans des fichiers JSON.

Cette thèse se concentre principalement sur le moteur d'adaptation, et s'appuie sur des modules préexistants que sont le gestionnaire de capteurs, le moteur d'inférence, le gestionnaire de méta-IHM, l'orchestrateur et l'injecteur d'adaptation. Le système existant se basait préalablement sur un moteur d'adaptation en logique booléenne uniquement, et il a été adapté afin de pouvoir utiliser, au choix du concepteur, soit la logique booléenne, soit la logique floue.

Le gestionnaire de capteurs est chargé de connaître les API JavaScript disponibles au sein du navigateur web, et de s'y connecter dès que possible afin d'obtenir une première représentation du dispositif de l'utilisateur. Il sert de couche d'encapsulation des différentes API du navigateur, utilisées afin de détecter un certain nombre de paramètres. Par exemple, afin de récupérer une image de la caméra, le gestionnaire de capteurs est chargé de se connecter à l'API du navigateur, cette dernière étant ensuite chargée de se connecter au système afin de pouvoir communiquer avec la caméra et ainsi récupérer une image.

Le moteur d'inférence a pour rôle de convertir les données brutes renvoyées par les différents capteurs en valeurs utilisables par le moteur d'adaptation. En effet, chaque capteur renvoie des valeurs qui lui sont propres. Par exemple la caméra renvoie une grille de pixels, c'est-à-dire un tableau de tableau de valeurs RGBa, où un pixel est défini par 4 valeurs : les niveaux de rouge, de

vert et de bleu, ainsi qu'un degré d'opacité. Ces valeurs n'étant pas exploitables en l'état, le moteur d'inférence est chargé d'analyser ce tableau permettant ainsi de pouvoir calculer une valeur de luminosité ambiante à partir de tous les pixels.

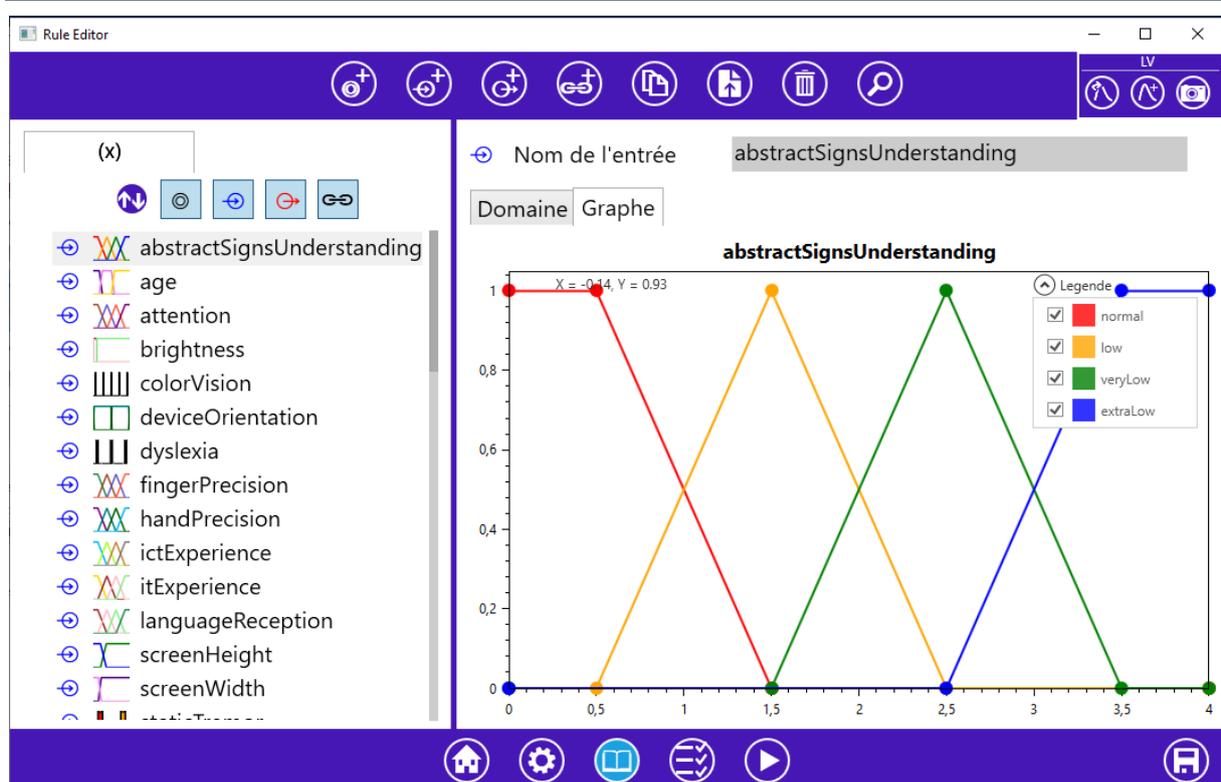
L'injecteur d'adaptation est chargé de mettre à jour l'IHM en fonction des dernières valeurs des paramètres d'IHM. Pour cela, le module effectue une correspondance entre les valeurs des paramètres de l'IHM et des règles CSS à activer ou désactiver à l'aide de classes ou d'attributs affectés à la balise Body ou d'une balise plus locale de la page web.

Le gestionnaire de méta-IHM est en charge d'instancier une méta-IHM sur l'IHM, donnant la possibilité à l'utilisateur de consulter les différentes caractéristiques du contexte d'usage avec leurs valeurs finales, détectées ou inférées, ainsi que les paramètres d'IHM avec leurs valeurs calculées. Au travers de cette méta-IHM, l'utilisateur a la possibilité de modifier, de figer et de défiger ces différentes valeurs, que ce soit pour celles du contexte d'usage ou celles des paramètres d'IHM. Une caractéristique figée par l'utilisateur (ou « déclarée ») ne peut plus être modifiée par le système.

2.2.2 Moteur d'adaptation en logique floue

Le travail de thèse a porté sur la réalisation d'un moteur d'adaptation. Il doit permettre de calculer un variant d'IHM adapté à l'utilisateur et de calculer les adaptations à mettre en place au sein de ce variant à partir des caractéristiques du contexte d'usage courant. Dans le cadre de cette thèse, le calcul des adaptations est effectué par un moteur en logique floue, ExpressIF, appelé grâce à un Web Service via une requête http. L'outil ExpressIF a été développé par CEA Tech. Il permet la création des différentes variables linguistiques d'entrées et de sorties nécessaires (Figure 30).

Figure 30 : ExpressIF - Création de variable



Chaque variable linguistique nécessite d'être nommée, définie sur un domaine (booléen, discret ou continu), puis requiert un graphique, détaillant la certitude des différents états de cette variable grâce aux fonctions d'appartenance.

Pour la définition de nos variables linguistiques, nous nous sommes basés sur la définition des variables utilisées au sein du projet MyUI [Peissner et al. 2012], qui définit la majorité de ses variables sur le domaine $[0;4]$, avec la valeur 0 qui représente une absence de problème, et la valeur 4 le niveau le plus élevé de ce problème (par exemple, une acuité visuelle à 0 signifie que l'utilisateur n'a aucun problème de vue, alors qu'une valeur de 4 représente une acuité visuelle particulièrement faible).

La majorité des caractéristiques (acuité visuelle, niveau d'attention, précision des mains, etc.) que nous utilisons est ainsi définie sur ce même domaine continu $[0;4]$ (voir Figure 30), et certaines caractéristiques utilisent un domaine discret lorsque la continuité sur un domaine ne fait plus sens, tel que la variable de vision des couleurs, listant les différents types de daltonisme (deutéranopie, tritanopie, protanopie et achromatie) (Figure 31).

En termes de graphique, l'outil permet la création de différents types de courbes : lignes brisées, triangle, trapèze, gaussienne normalisée, sigmoïde, sigmoïde inversée et courbe en cloche (Figure 32). Cependant, comme cela a été précisé au début de chapitre, lors de la présentation de la logique floue, plusieurs travaux recommandent en particulier l'utilisation de courbes triangulaires et trapézoïdales [Pedrycz 1994 ; Barua et al. 2014]. Nous avons donc défini nos variables en utilisant ces types de courbes.

Au sein de MyUI, le domaine des variables est divisé en 4 sous-domaines $[0;1]$, $]1;2]$, $]2;3]$ et $]3;4]$, représentant les différents états (par exemple, respectivement une acuité visuelle normale, faible, très faible et minimale), avec un passage d'un état à un autre aux seuils de valeur 1, 2 et 3. Nous nous sommes basés sur ce formalisme pour la définition de nos variables linguistiques, auquel nous avons ajouté une gestion de l'incertitude au niveau de ces seuils. En effet, pour une valeur proche de l'un de ces seuils (par exemple la valeur 1), il est difficile d'affirmer que l'état précédent ou l'état suivant serait préférable. Nous avons donc traduit ces seuils par une certitude de 50% pour les deux états concernés (précédant et suivant) au sein de nos variables linguistiques. Par exemple, dans la Figure 30, une valeur de 1 se traduit par un croisement des courbes des deux états, « normal » et « faible », représentant une certitude de 50% dans l'état « normal » et de 50% dans l'état « faible ». En s'éloignant de ces seuils, les certitudes des différents états concernés augmentent et diminuent proportionnellement. Par exemple, une valeur de 1.25 se traduit par une certitude de 75% pour l'état « faible » et de 25% pour l'état « normal ». Enfin, à la valeur 1.5, l'état « faible » atteint une certitude de 100% alors que l'état normal est à 0%. Nous avons ainsi défini nos variables linguistiques pour qu'elles aient, pour toute valeur du domaine, une certitude cumulée de 100%.

Figure 31 : ExpressIF – Exemple de variable définie sur un domaine discret

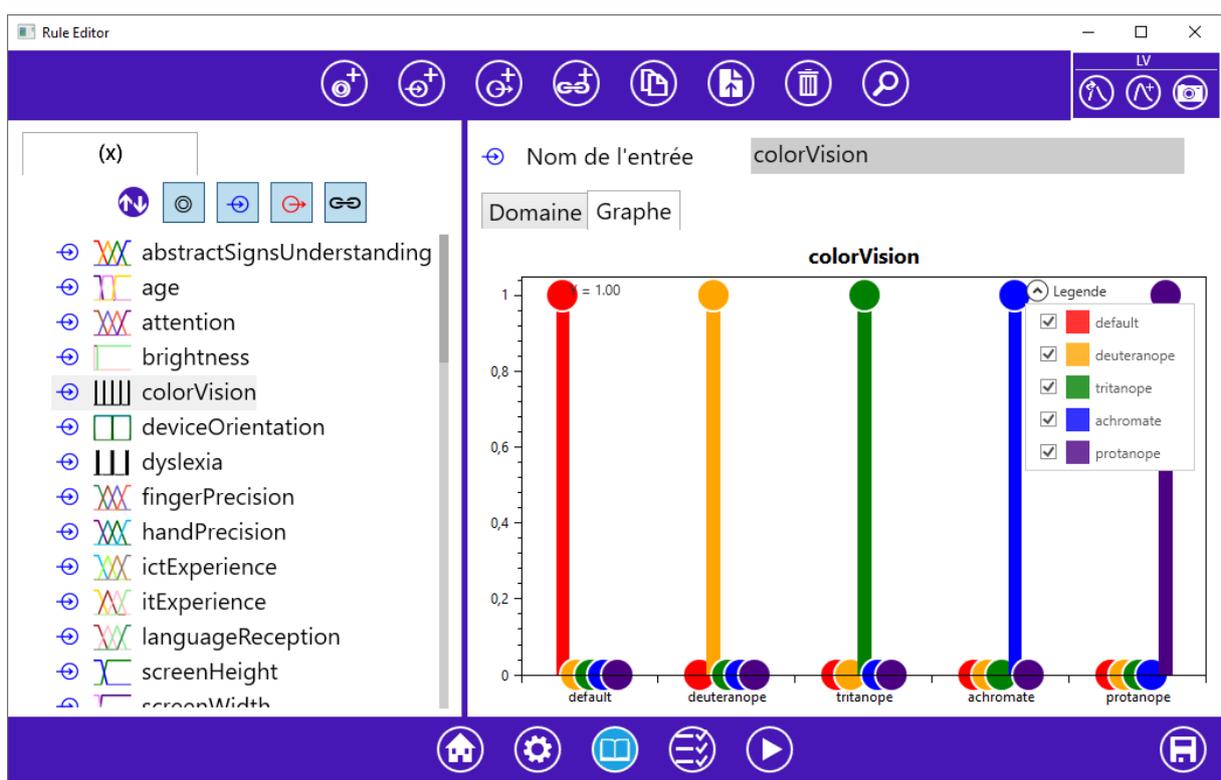
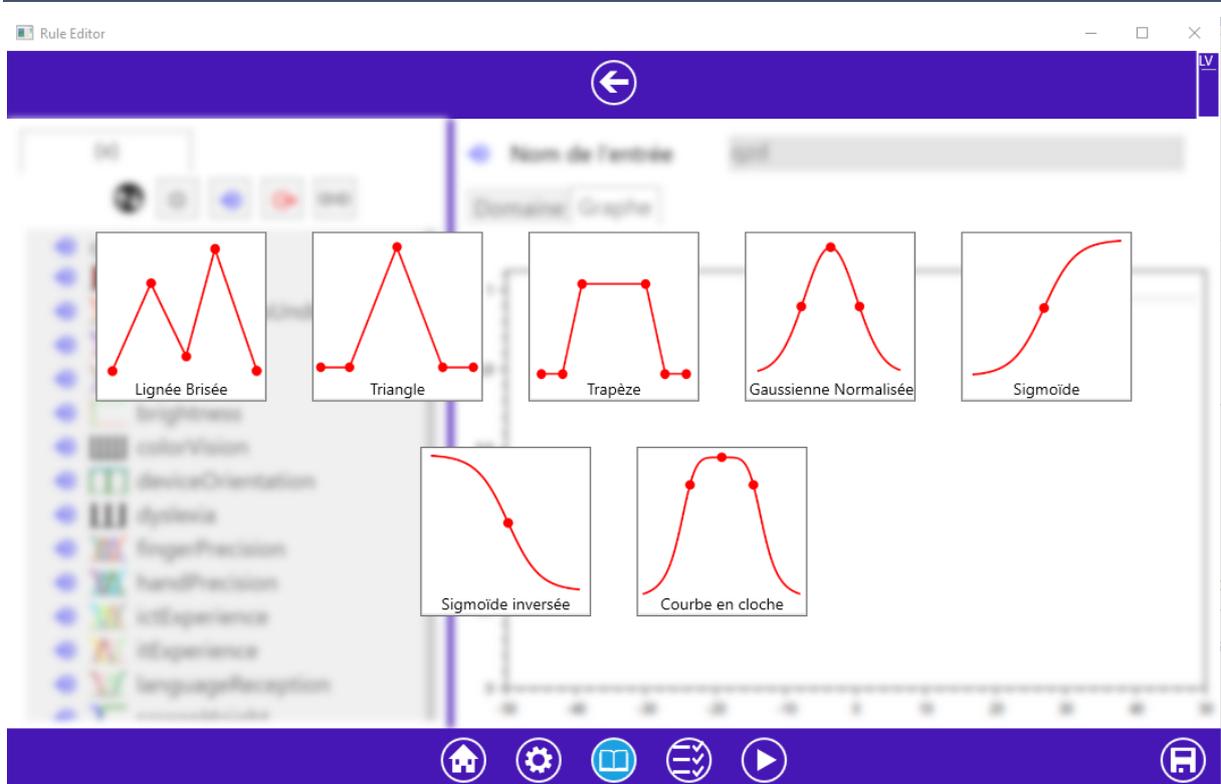


Figure 32 : ExpressIF - Les différents types de courbe possibles



Les variables linguistiques de sortie nécessitent une étape supplémentaire qui est l'ajout d'une méthode d'agrégation et d'une méthode de défuzzification. Ces deux méthodes permettent de finaliser le calcul en logique floue. L'exécution des règles floues, décrites ci-après, permettent en effet de calculer une ou plusieurs aires correspondant au niveau d'activation des différents états des variables (voir section III.1.5). Ces aires sont généralement agrégées pour n'en former qu'une, à partir de laquelle la méthode de défuzzification se base afin de calculer une valeur non-floue utilisable en dehors du moteur en logique floue, dite valeur « crisp ».

Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de regrouper l'étape d'agrégation et l'étape de défuzzification en une étape unique. Le principe de notre méthode est, pour chacune des règles, de calculer le barycentre du sous-ensemble flou de sortie, puis de calculer la moyenne pondérée de ces barycentres, dont la pondération va dépendre de la superficie de l'aire de ce sous-ensemble flou. En considérant toutes les règles ayant une même sortie, la valeur défuzzifiée peut s'écrire :

$$d(sortie) = \frac{\sum_i C_i \times A_i}{\sum_i A_i}$$

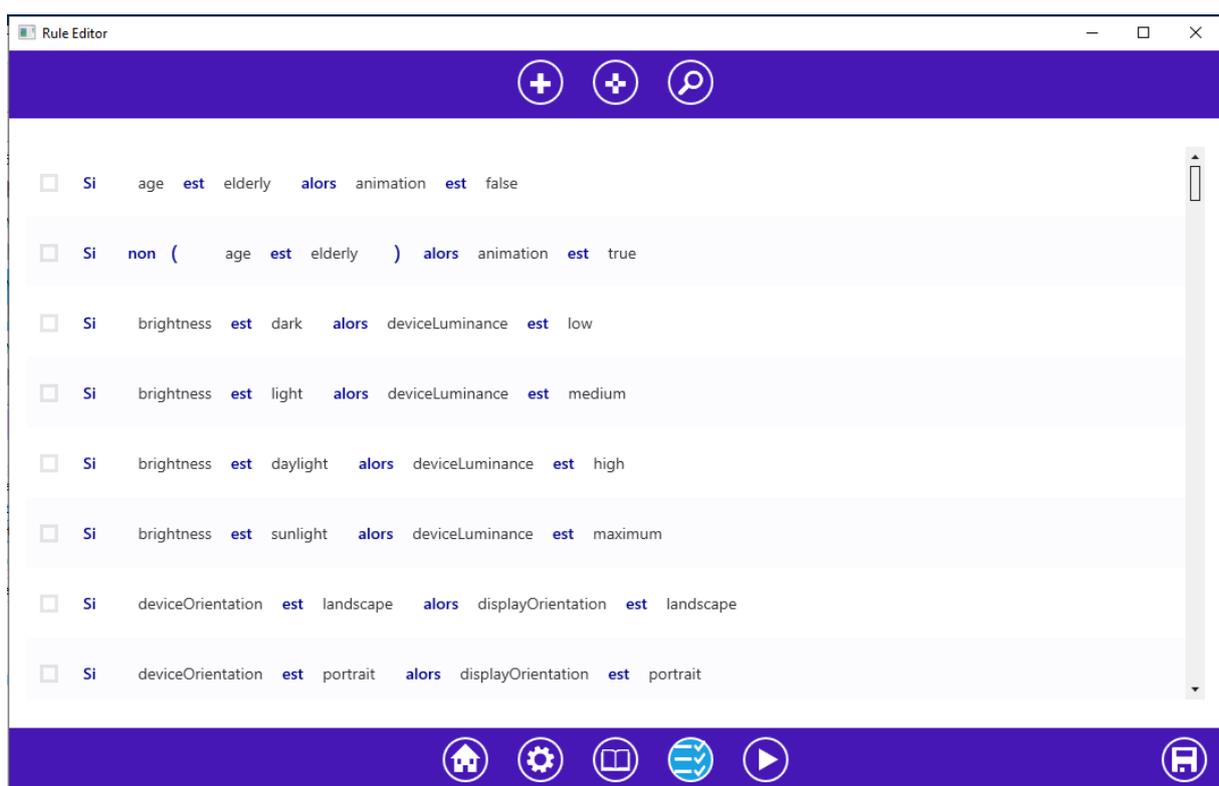
où C_i est la valeur du barycentre et A_i l'aire sous la courbe pour la $i^{\text{ème}}$ règle concernant cette sortie.

Cette défuzzification est utilisable sur des variables linguistiques continues et nous avons pu l'adapter aux variables discrètes lorsqu'elles sont ordonnées, car cet ordre permet de donner du sens au barycentre. Dans ce cas, la valeur de sortie finale est déterminée comme étant celle qui est la plus proche de la somme pondérée des barycentres. Cela permet d'assurer une transition progressive entre les différentes valeurs d'une sortie, même dans le cas de domaines discrets ordonnés.

Une fois les variables linguistiques nécessaires créées, l'étape suivante est la définition des règles floues (Figure 33). Le moteur ExpressIF permet de gérer des règles de la forme « Si a est ax alors b est bx », avec a et b des variables linguistiques, respectivement d'entrée et de sortie, et ax et bx étant un état donné de chacune des variables. Par exemple « Si age est elderly alors animation est false ».

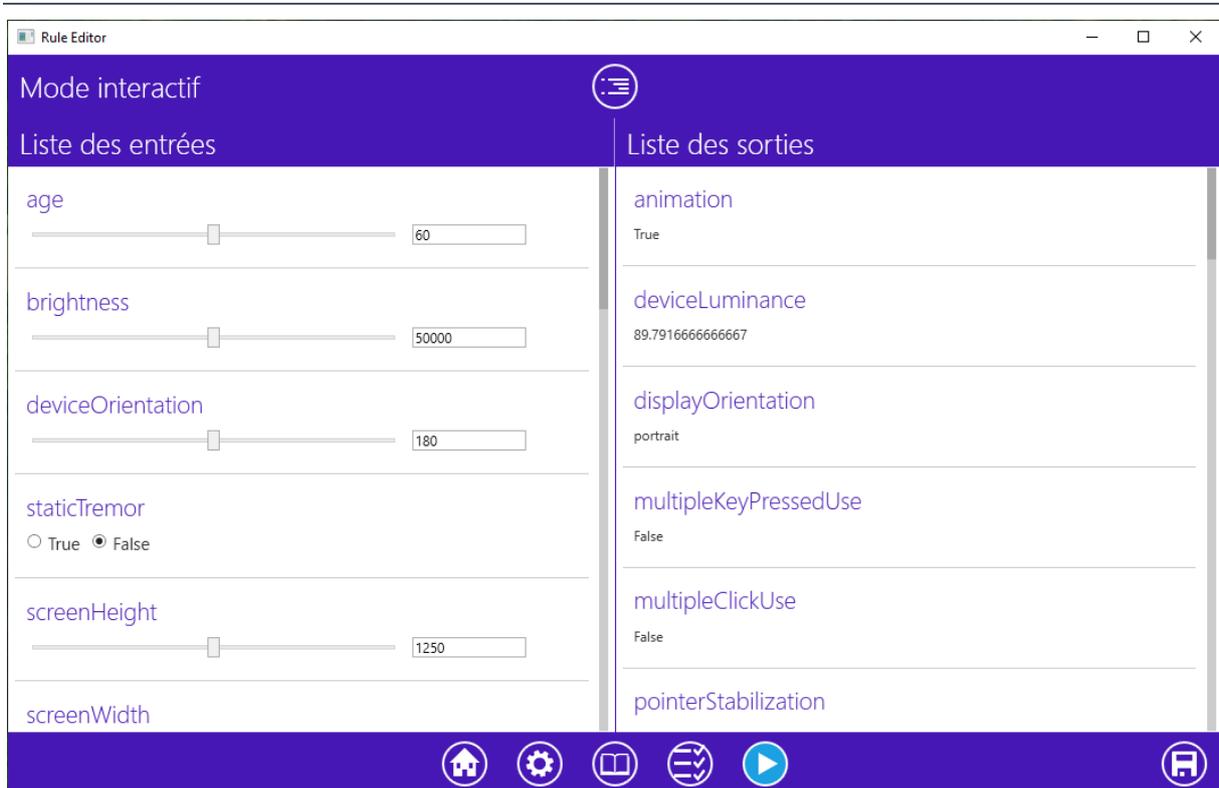
La logique floue permet d'utiliser les opérateurs logiques de négation (NON), de conjonction (ET) et de disjonction (OU) au sein de la prémisse des différentes règles. Toutefois, nous avons visé une définition de règles « simple ». Chaque règle ne se base ainsi que sur une seule caractéristique du contexte d'usage, la combinaison des règles étant gérée par le biais de l'étape de défuzzification choisie, le barycentre pondéré.

Figure 33 : ExpressIF - Listing des règles floues créées



Enfin, l'outil propose un « mode interactif », permettant d'effectuer des tests en modifiant les diverses valeurs d'entrées des variables linguistiques afin de voir les résultats produits par l'ensemble de règles définies (Figure 34).

Figure 34 : ExpressIF - Mode interactif



Dans le cas où un développeur souhaite adopter cette approche d'adaptation des IHM, et afin de limiter le coût de développement, nous préconisons de limiter le nombre de variants en s'appuyant quand c'est possible sur les possibilités offertes par le Responsive Web Design – y compris les flexboxes et les grilles CSS. En effet, une page écrite avec un CSS « responsive » peut déjà prendre en compte des modifications liées aux variations de taille d'écran. Par exemple, il peut permettre de transformer deux espaces de travail placés côte-à-côte sur un grand écran en deux espaces l'un au-dessus de l'autre. Un variant peut donc parfaitement être 'responsive' et être adapté pour plusieurs tailles d'écran. Cependant, le Responsive Web Design présente des limites : (a) il ne peut prendre comme condition de changement que la nature du dispositif (imprimante, mobile...) et sa taille d'écran (il est impossible d'exprimer des variations spatiales en fonction de la taille de police, par exemple), que (b) il ne peut avoir qu'un impact limité sur la réorganisation spatiale (certaines modifications comme convertir un espace de travail en onglet sont très délicates à programmer et plus encore à maintenir car la page doit contenir toutes les variations et le CSS ne sert plus qu'à décider laquelle est affichée) et qu'enfin (c) il ne gère pas mieux les transformations d'interacteurs (liste de cases à cocher sur PC devenant une liste à puces sur SmartPhone), l'existence des variants permet d'élargir les possibilités, en permettant de créer des variations des IHM, dédiés à des conditions hors de portée du Responsive Web Design. Mobiliser à la fois les variants et le Responsive Web Design permet ainsi de limiter le nombre de variants (ce qui optimise le coût de développement et de maintenance) tout en pouvant dépasser si besoin les limites du CSS.

Si un développeur souhaite modifier les adaptations mises en place, plusieurs possibilités s'offrent à lui : il peut modifier les règles d'adaptation, afin que le calcul des paramètres lui corresponde mieux (et par induction que le rendu de l'IHM soit plus adéquatement adapté) ou encore modifier les règles CSS elles-mêmes afin de personnaliser l'adaptation. Nous préconisons une modification du CSS, bien que les autres méthodes restent disponibles dans le cas où une modification du CSS ne soit pas la plus appropriée. Par exemple, si un développeur ne souhaite pas différencier les luminosités ambiantes « sombre » et « très sombre » en appliquant un même fond d'écran gris. Avec une modification du CSS, le développeur conserve les deux règles standards et doit les modifier pour préciser les deux cas de figures : une règle « luminosité sombre Alors fond gris » et une seconde « luminosité très sombre Alors fond gris ». Dans ce cas de figure, il est préférable de modifier la règle d'adaptation elle-même afin de regrouper les deux cas en une seule règle et éviter ainsi de modifier inutilement les attributs de la page, sans modification de rendu de l'IHM.

Le moteur d'adaptation actuel s'appuie sur 87 règles en logique floue : 73 règles portant sur l'utilisateur, 6 règles pour la plate-forme et 8 règles pour l'environnement. L'ensemble de ces règles est fourni en Annexe 2 : Liste des règles d'adaptation implémentées dans Fuzzy4U. Il n'a pas pour objectif d'être exhaustif, mais d'être suffisamment important pour être réaliste et permettre de mettre en avant la combinaison des règles effectuée par la logique floue. Par la suite, nous nous focaliserons sur les règles liées à l'accessibilité, qui sont au cœur de notre travail de thèse.

3 Accessibilité : règles et prototype

Cette sous-section présente un ensemble de règles que nous avons mis en œuvre au sein de notre prototype afin de montrer l'intérêt de la logique floue pour l'adaptation des interfaces. Dans un deuxième temps, une partie d'entre elles sont illustrées au sein d'un prototype de site web pour notre exemple fil rouge.

3.1 Règles pour l'accessibilité

Le premier point à noter est que certaines préconisations pour l'accessibilité sont destinées à être exploitées lors de la création de l'IHM par un concepteur ou un développeur humain et sont difficiles (en l'état actuel) à implémenter sous forme d'adaptation d'IHM. Par exemple, la règle 1.2.1 du WCAG précise que tout contenu purement vidéo doit être accompagné à minima soit d'une auto-description soit d'une version alternative (textuelle ou audio). La mise à disposition d'une telle alternative ne relève pas du système d'adaptation. On pourrait dès lors supposer que la règle 1.2.1 n'est pas utile pour notre objectif. Cependant, si l'on va plus loin, on peut réinterpréter la règle en termes d'adaptation : lorsque l'utilisateur est malvoyant et que l'interface propose un médium purement visuel, il convient d'offrir par défaut une version alternative, comme l'affichage en braille de l'auto-description si l'utilisateur dispose de cette possibilité, ou l'utilisation d'une version audio ; lorsque l'utilisateur est sourd, il convient d'afficher les sous-titres sans que l'utilisateur ait à les demander.

Nous présentons ci-dessous la traduction en règles des trois catégories de recommandations citées (WCAG, EAPM et WAI-AGE). Les règles sont dans un premier temps exprimées suivant la syntaxe la plus communément utilisée, « If ... then... », avant de montrer comment elles sont exploitées dans notre proposition. Notre objectif ici est d'obtenir des règles aussi simples que possible. L'intérêt principal de cette approche est d'obtenir des règles facilement compréhensibles et facilement réalisables.

Nos règles sont aussi structurées pour prendre en compte la situation de l'utilisateur à chaque instant, et ainsi adapter les IHM aux difficultés, qu'elles soient persistantes ou situationnelles [Wobbrock 2019]. Pour cela, elles s'appuient sur des caractéristiques dynamiques et évolutives du contexte d'usage. Ces caractéristiques peuvent être d'une part soit déclarées par l'utilisateur soit, lorsque c'est possible, inférées par le système. Par exemple, on peut inférer la tranche d'âge d'une personne par l'analyse d'une photographie prise avec la caméra de son dispositif, mais ses préférences en termes de couleurs ou de volumétrie de texte doivent être déclarées. D'autre part, les caractéristiques peuvent être soit énumérées (la tranche d'âge peut être 'kid', 'teenager', 'grown-up', ou 'senior') soit être plus ou moins vraies (la dyslexie pouvant être plus ou moins prononcée, on considère que l'attribut 'dyslexic' est plus ou moins vrai). Les règles sont destinées à calculer les paramètres d'IHM qui définissent les caractéristiques attendues de l'IHM, par exemple, avoir comme résultat 'language=FR' (la langue utilisée dans l'interface sera le français) ou 'backgroundLuminosity is darker' (l'arrière-plan doit être assombri). Enfin, au-delà des règles, le moteur en logique floue nous permet de combiner ces règles par le biais de la méthode de défuzzification.

Dans les sections suivantes, nous montrons comment nous avons transcrit quelques règles d'accessibilité en règles d'adaptation. Nous avons choisi des règles simples, qui peuvent

s'appliquer régulièrement et qui illustrent les adaptations à des problématiques persistantes (telle que l'acuité visuelle) ou situationnelles (telle que la luminosité ambiante).

3.1.1 Taille de police

Nous n'avons trouvé aucune recommandation du W3C concernant la taille de police à appliquer par défaut. La taille par défaut utilisée semble être celle des navigateurs, généralement définie à 16px, d'après le site W3C Online Web Tutorials (W3School).

Le WCAG recommande de donner la possibilité d'agrandir le texte jusqu'à 200% de sa taille d'origine (recommandation n° 1.4.4), et les EAPM du W3C indiquent quant à elles que certaines personnes ont besoin d'une taille de police plus grande afin de pouvoir distinguer les lettres (n° 3.3.1). Toutefois, ils précisent aussi que d'autres personnes, ayant par exemple une bonne acuité visuelle, mais un problème de vision tunnelisée (altération de la vision périphérique), peuvent préférer de plus petites lettres pour visualiser davantage de mots. Il n'est toutefois pas précisé à quelle taille de police correspond « plus petites lettres ». Nous avons donc choisi de traduire cela par la possibilité de réduire un texte jusqu'à 50% de sa taille d'origine. La taille de texte doit donc pouvoir être agrandie jusqu'à 200% de sa taille originale et réduite jusqu'à 50%, ce qui, en se basant sur la taille par défaut de 16px, se traduit par une fourchette allant d'un minimum de 8px à un maximum de 32px.

D'autres catégories de personnes peuvent bénéficier d'une adaptation de la taille de police. Ainsi, pour les personnes âgées, le projet WAI-AGE recommande l'utilisation de police de caractères d'une taille minimale de 12-14pt, soit 16-19px¹. [De Lara et al. 2010] indique dans son critère de réussite 2.4.14 que les liens adjacents doivent fournir suffisamment d'espace de clic pour éviter les erreurs –les utilisateurs âgés ont des difficultés à cliquer dans de petites zones de liens. [Dellaporta 2007] recommande un texte de grande taille pour les liens hypertextes, une zone de prise en compte du clic suffisamment importante, et un espacement adéquat entre interacteurs afin d'éviter toute activation accidentelle.

Concernant les utilisateurs dyslexiques, [McCarthy et al. 2010] indiquent que l'un de principaux problèmes rencontrés est de trouver le texte trop petit. [De Santana et al. 2012] indiquent que la plus petite taille de texte recommandée se situe entre 12 et 14px, et [Rello et al. 2013] recommandent une taille de 18pt, ce qui se traduit par 24px.

A partir de ces données, nous pouvons établir les règles élémentaires suivantes, avec les caractéristiques suivantes : `visualAcuity` décrit l'acuité visuelle de l'utilisateur, `age` son âge, `dyslexic` son niveau de dyslexie (plus ou moins vrai), `tunnelVision` sa perte de vision périphérique, `fontSize` la taille de police de caractères du texte, `linkSize` la taille des hyperliens.

```
(R1) if visualAcuity is low then fontSize is bigger
(R2) if age is senior then fontSize is bigger
(R3) if dyslexia is high then fontSize is bigger
(R4) if tunnelVision is high then fontSize is lower
(R5) if age is senior then linkSize is bigger
```

¹ Pour mémoire, le point est une ancienne unité d'imprimerie qui correspond à une taille en centimètres, et qui n'a donc pas de correspondance directe en informatique, mais qui est considéré comme valant 1,333 pixel.

Les termes “bigger” et “lower” sont ici utilisés en prenant pour base la valeur de police de caractères par défaut du site. La première règle pouvant se traduire par « plus l’acuité visuelle est faible, plus il faut augmenter la taille de la police ». Ainsi, une taille de police par défaut définie à 16px sera agrandie ou diminuée en fonction des différentes caractéristiques. Par exemple à 20 px, si l’utilisateur est une personne âgée, ou à 22px si l’utilisateur est une personne âgée et qu’il a une acuité visuelle légèrement amoindrie.

3.1.2 Niveau de contraste et gestion de couleurs

La problématique des couleurs utilisées sur une IHM est complexe. En effet, comme l’ont dit Sarah Horton et Whitney Quesenbery, « sans contraste, le monde entier serait gris. Les concepteurs doivent respecter les besoins en contraste de couleur pour les personnes avec une vision ou une perception de couleurs dégradées. Les combinaisons de couleurs qui sont facilement distinguables pour quelqu’un avec une vision normale peuvent ne pas fonctionner pour des personnes souffrant de l’un des nombreux handicaps visuels existants. La perception des couleurs peut aussi être réduite par des facteurs environnementaux, comme les paramètres d’affichage ou les conditions lumineuses » [Horton et al. 2014]. Cet extrait illustre bien l’impératif de prendre en compte non seulement les différentes caractéristiques de l’utilisateur mais aussi d’autres paramètres comme sa plate-forme et son environnement pour arriver à un compromis acceptable. Dans ce contexte, la luminosité du dispositif est un élément important pouvant influencer sur le contraste. Cependant, le réglage de cette luminosité depuis une application ou un site Internet n’est le plus souvent pas réalisable, voire jamais dans le cas des sites Internet. Il n’est pas non plus évident que ce réglage automatique suffise à maintenir l’utilisabilité de l’IHM : nous avons tous l’expérience d’une IHM illisible en plein soleil malgré les tentatives de compensation de notre téléphone. L’IHM elle-même doit renforcer l’adaptation en modifiant la palette des couleurs utilisées.

Le WCAG recommande un contraste entre l’arrière-plan et le texte selon un ratio d’au moins 4.5:1 afin de respecter le niveau intermédiaire d’accessibilité (level AA - recommandation 1.4.3), et un ratio d’au moins 7:1 pour le niveau élevé (level AAA - recommandation 1.4.6).

La recommandation 2.4.2 des EAPM précise qu’un fond d’écran clair ne sera pas lisible, voire douloureux pour des personnes atteintes d’une sensibilité accrue à la lumière, ou photophobie. Ces utilisateurs nécessiteront donc un fond d’écran plus sombre. De plus, la recommandation 3.1.2 du W3C traite du contraste entre le fond d’écran et le texte et précise que : 1) pour ces personnes photophobes, le texte a aussi besoin d’avoir une faible luminosité, et 2) d’autres personnes, incluant notamment les personnes âgées (qui subissent classiquement une perte de sensibilité à la lumière), nécessiteront un contraste élevé entre le fond d’écran et le texte, et que certains lisent notamment mieux avec un texte clair sur un fond sombre.

[De Santana et al. 2012] recommandent d’éviter les fonds d’écran d’un blanc pur pour les utilisateurs atteints de dyslexie, car une part significative d’entre eux est trop sensible à sa luminosité (sensibilité scotopique) et verra le texte comme s’il vibrait ou s’il était flou. Il est recommandé de privilégier des couleurs pastel, par exemple d’un texte bleu foncé sur un fond beige. En cas de dyslexie, il conviendra d’utiliser plutôt des fonds et des textes de couleurs pastel, tout en maintenant un bon niveau de contraste.

Une autre catégorie de personnes pouvant avoir des problèmes de contraste sont les daltoniens, qui représentent environ 8% de la population masculine et 2% de la population féminine [Iaccarino et al. 2006]. Le daltonisme se traduit par un « écrasement » des couleurs perçues qui induit un problème de contraste lorsque les couleurs perçues ont des luminosités trop proches les unes des autres. Il conviendra d'éliminer les couleurs non perceptibles en fonction du type de daltonisme et de les remplacer dans des couleurs ayant la même luminosité que les couleurs initiales, pour maintenir le contraste [Mochizuki et al. 2008].

Enfin, en cas d'environnement sombre, [Rempel et al. 2011] recommande d'utiliser une polarité négative (c'est-à-dire un texte clair sur un fond sombre) afin d'améliorer la lisibilité. Nous traduirons cette préconisation par la mise en place d'un arrière-plan de plus en plus sombre en fonction de la luminosité ambiante.

Nous pouvons déduire plusieurs règles de ces considérations, pour faire varier le niveau de contraste et/ou de luminosité, non pas en cherchant à calculer directement une couleur qui pourrait se trouver en contradiction avec la charte graphique de l'application, mais en évaluant dans quelles directions doit se faire l'adaptation puis en calculant les couleurs résultantes à partir de la charte graphique :

(R6) If photophobia is high	then backgroundLuminosity is darker
(R7) If age is senior	then backgroundLuminosity is lighter
(R8) If dyslexia is high	then backgroundLuminosity is darker
(R9) If ambientLight is sunlight	then backgroundLuminosity is lighter
(R10a) If ambientLight is low	then backgroundLuminosity is darker
(R10b) If ambientLight is veryLow	then backgroundLuminosity is darker
(R10c) If ambientLight is extraLow	then backgroundLuminosity is darker
(R11) If dyslexia is high	then backgroundSaturation is pastel
(R12) If ambientLight is sunlight	then contrastLevel is higher
(R13) If photophobia is high	then contrastLevel is lower
(R14) If Deuteranopia is high	then greenAvoidanceLevel is higher
(R15) If Protanopia is high	then redAvoidanceLevel is higher
(R16) If Tritanopia is high	then blueAvoidanceLevel is higher

De même que pour les termes « bigger » et « lower » utilisés pour la taille de la police dans la sous-section précédente, les termes "darker", "lighter", « higher » et « lower » sont là aussi à corrélérer avec les valeurs par défaut utilisées sur le site pour les différentes caractéristiques de sortie.

Concernant la gestion des couleurs et le niveau de contraste, nous avons choisi de traduire les recommandations par l'utilisation de 3 variables : luminosité de l'arrière-plan (backgroundLuminosity), niveau de saturation de l'arrière-plan (backgroundSaturation) et niveau de contraste (contrastLevel). La luminosité et la saturation correspondent à deux des trois composantes du système de gestion des couleurs TSL (Teinte Saturation Luminosité). La troisième composante, la teinte, ne sera pas modifiée car elle correspond à la charte graphique du site web.

Après avoir défini une nouvelle couleur d'arrière-plan en fonction de la luminosité et de la saturation, la variable de niveau de contraste est ensuite utilisée pour calculer une couleur de police ayant un contraste suffisant avec la nouvelle couleur d'arrière-plan.

Enfin, les recommandations en termes de polarité ont été traduites ici par plusieurs règles pouvant se renforcer : à mesure que la luminosité baisse, la luminosité de l'arrière-plan sera assombrie de façon de plus en plus prononcée.

3.1.3 Espacements entre lettres, mots, lignes et paragraphes

Concernant l'espacement entre les différentes lettres, mots, lignes et paragraphes, la recommandation 1.4.8 du WCAG indique de fournir à l'utilisateur la possibilité de sélectionner parmi plusieurs espacements de lignes et de paragraphes ; avec notamment un choix d'espacement de ligne d'au moins 1.5 pour les blocs de texte, et un espacement de paragraphe d'au moins 1.5 fois l'espacement de lignes. La recommandation 1.4.12 du WCAG indique quant à elle que l'espacement entre les lettres doit être d'au moins 0.12 fois la taille de la police, l'espacement entre les mots doit être d'au moins 0.16 fois la taille de la police, l'espacement entre les lignes doit être d'au moins 1.5 fois la taille de la police, et l'espacement entre les paragraphes doit être d'au moins 2 fois la taille de la police.

Les EAPM indiquent que, pour pouvoir lire un texte, certaines personnes nécessitent plus d'espacement entre les lettres (recommandation 3.4.2), entre les mots (recommandation 3.4.3) et entre les lignes d'un bloc de texte (3.4.1) ;

[Dellaporta 2007] recommande d'utiliser un espacement doublé entre les mots pour les personnes âgées. [Rello et al. 2012] recommandent, pour les personnes dyslexiques, un espacement de lettres augmenté de 7%, un espacement de lignes 1.4 fois plus grand que l'espacement standard, et un espacement de paragraphe correspondant à 1 ligne de texte vide, soit 2 fois l'espacement de lignes.

Nous déduisons les règles suivantes, où `wordSpacing`, `lineSpacing` et `paragraphSpacing` représentent l'espacement à utiliser entre respectivement les mots, les lignes et les paragraphes :

(R17) If `visualAcuity` is low then `letterSpacing` is bigger

(R18) If `dyslexia` then `letterSpacing` is bigger

(R19) If `visualAcuity` is low then `wordSpacing` is bigger

(R20) If `age` is senior then `wordSpacing` is bigger

(R21) If `dyslexia` is high then `wordSpacing` is bigger

(R22) If `visualAcuity` is low then `lineSpacing` is bigger

(R23) If `age` is senior then `lineSpacing` is bigger

(R24) If `dyslexia` is high then `lineSpacing` is bigger

(R25) If `age` is senior then `paragraphSpacing` is bigger

(R26) If `dyslexia` is high then `paragraphSpacing` is bigger

La sous-section suivante illustre certaines de ces règles au travers de notre exemple fil rouge, le cas de Bernard qui consulte le site web d'un hôtel.

3.2 Prototype de réservation de chambres d'hôtel

Dans notre exemple fil rouge décrit en chapitre II, Bernard, 79 ans, a une vision dégradée, est atteint de cataracte et souffre aussi d'arthrose. En visite à Lyon, il consulte le site web d'un hôtel dans deux situations différentes (en entrant et en sortant du métro).

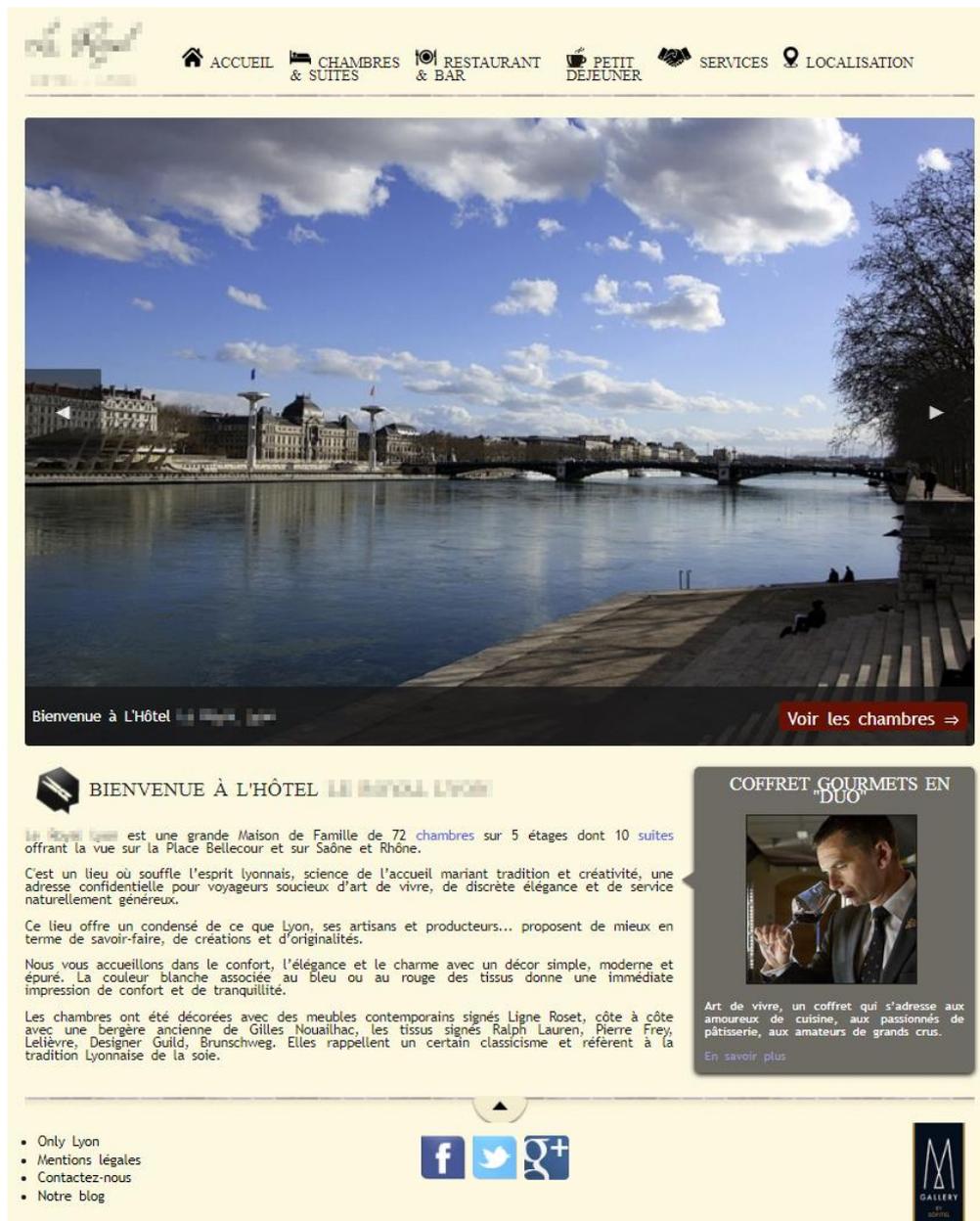
Notre prototype est un site web de réservation d'hôtel. Il comprend 8 pages : (1) une page d'accueil, présentant l'hôtel (voir Figure 35) ; (2) une page détaillant les différentes chambres et suites proposées par l'hôtel (descriptions succinctes et détaillées) ; (3) une page de présentation du service restaurant et bar ; (4) une page de présentation du service de petit-déjeuner ; (5) une page de présentation des divers services proposés par l'hôtel (wifi, télévision, voiturier, ...) ; (6) une page de localisation, donnant l'adresse de l'hôtel, et les meilleurs moyens d'accès (voir Figure 23 et Figure 24) ; (7) une page de réservation comprenant un formulaire permettant de sélectionner la chambre et la période à réserver ; et (8) une page de confirmation de réservation.

Les adaptations s'exécutent suffisamment rapidement pour ne pas gêner la navigation (environ 80ms pour naviguer d'une page à une autre).

Par la suite, nous présentons l'exemple de Bernard en nous appuyant sur le prototype même si certaines règles d'adaptation illustrées dans cet exemple ne sont pas implémentées bien qu'elles ne posent, a priori, pas de problème spécifique. Les adaptations présentées dans cette section sont donc celles envisagées.

La page de localisation du site de l'hôtel est présentée sur la Figure 23 (pour un variant PC – choisi lorsque la taille d'écran est plutôt proche de 1280x900 pixels) et la Figure 24 (pour un variant smartphone – choisi lorsque la taille d'écran s'approche plutôt de 320x480 pixels). Sur la version non adaptée de cette IHM, la taille de police est définie à 12,8px, ce qui est inférieur à la taille que nous avons identifiée comme taille par défaut (16px). L'arrière-plan est beige (en RGB : 255, 249, 222) tandis que le texte est gris foncé (en RGB : 24, 24, 24). Calculé avec les formules du WCAG, le ratio de contraste est de 16.8:1, ce qui est largement conforme aux préconisations (au minimum 7.1:1, voir section 3.1 « Niveau de contraste et gestion de couleurs ») pour une utilisation en luminosité normale.

Figure 35 : Page d'accueil de l'hôtel (non adaptée – variant PC)



Lors de l'ouverture du site web, le moteur d'inférence détecte la situation courante : il évalue la taille de l'écran de Bernard, déduit qu'il s'agit d'un smartphone et charge ainsi le variant correspondant. L'adaptation se base ensuite sur différentes caractéristiques du contexte d'usage, déclarées ou inférées, afin de mettre en place des adaptations. La luminosité ambiante est captée dans le but de détecter que Bernard est dans un environnement relativement sombre, étant dans le métro. Bernard a par ailleurs déclaré des caractéristiques personnelles : il a donné sa date de naissance, il a indiqué souffrir de la cataracte (à un niveau qu'il a estimé « assez fort ») et de daltonisme dû à cette cataracte. Il a aussi précisé ne pas être dyslexique, ni atteint de vision tunnelisée.

Si l'IHM ne s'adaptait pas à cette situation, Bernard n'aurait pas le choix : il devrait zoomer sur la page ou modifier le paramétrage de son navigateur pour agrandir la taille de police de caractères. Cependant, n'ayant qu'une main libre du fait de sa canne, zoomer à l'aide d'un

pincement serait complexe. De plus, outre le fait de nécessiter une action utilisateur, le zoom proportionnel entraîne généralement le besoin de scroller horizontalement pour chaque ligne à lire, ce qui n'est pas recommandé (WCAG), encore moins pour les personnes âgées (WAI-AGE). Il ne pourrait pas facilement augmenter l'espacement des lettres, mots et paragraphe, alors que nous avons vu que c'est un facteur de confort.

Dans le cas présent, avec une interface adaptative, le moteur active les règles floues impactées par l'acuité visuelle de Bernard, son âge, sa photophobie, ainsi que la luminosité ambiante : R1, R2, R5, R6, R7, R10, R13, R17, R19, R20, R22, R23 et R25. Ces règles nous renvoient une valeur pour la taille de police de tout texte (R1 et R2) et la taille de police des hyperliens en particulier (R1, R2 et R5), le niveau de luminosité et de saturation de l'arrière-plan (R6, R7 et R10), le niveau de contraste entre arrière-plan et texte (R13), et les divers espacements (R17, R19, R20, R22, R23 et R25). Un point important ici est que les règles peuvent se renforcer mutuellement ou s'opposer. Concernant l'espacement entre les mots, le fait que Bernard soit considéré comme âgé entraîne une augmentation de l'espacement (R20) tout comme le fait qu'il soit aussi considéré comme ayant une acuité visuelle dégradée, entraînant le même effet (R19). En termes de niveau de contraste et de gestion des couleurs, nous avons ici des règles ayant des finalités opposées ; avec un assombrissement de l'arrière-plan dû à la photophobie (R6) et la diminution de la luminosité ambiante (R10) d'un côté, et un éclaircissement dû à l'âge de Bernard (R7). Ici, la combinaison du lot de règles R10 ainsi que la règle R6 auraient plus de poids que la règle R7, entraînant donc la mise en place d'une interface assombrie (voir Figure 29a).

Une fois arrivé à sa station de métro, Bernard reprend son téléphone afin de regarder comment arriver jusqu'à l'hôtel. Pendant qu'il consulte la page de localisation de l'hôtel Bernard sort de la station de métro, la luminosité ambiante augmente donc peu à peu, jusqu'à atteindre le plein soleil à l'extérieur. Le système réagirait en activant de moins en moins le lot de règles R10 et en débutant l'activation de la règle R12. La diminution de R10 entraîne un retour à la normal en terme de luminosité d'arrière-plan, et l'interface va donc revenir à sa version standard avec fond beige clair. Cependant la règle R12 déclenche une augmentation du niveau de contraste avec le texte. La condition « if sunlight » étant de plus en plus vérifiée au fil de l'avancement de Bernard vers la sortie, la règle préconise un ratio de contraste de plus en plus fort, ce qui entre en contradiction avec les conclusions de la règle R13 : la cataracte induisant d'une légère photophobie, la condition « if photophobe » a une probabilité non nulle et tend donc à légèrement atténuer le contraste. La combinaison des règles en logique floue permet de trouver un compromis sans avoir besoin de déterminer un système de priorisation : le contraste préconisé dans une telle situation est ainsi légèrement inférieur à celui que recommanderait la règle sur la luminosité seule (voir Figure 29b).

3.3 Discussion

Nous avons illustré avec des exemples concrets comment notre prototype peut permettre de prendre en compte les règles d'accessibilité. Ce prototype est de taille réaliste pour un site web. Les règles à mettre à œuvre simultanément sont suffisamment nombreuses (81) pour obtenir une combinaison de règles réaliste.

Dans l'exemple de Bernard, nous avons détaillé un ensemble de 26 règles ; nous avons montré une situation nécessitant l'activation simultanée de 13 d'entre elles ; enfin, comme c'était le cas

pour le calcul du niveau de contraste, nous avons aussi décrit comment les règles peuvent s'opposer ou se renforcer et comment le moteur d'adaptation en logique floue, grâce à la défuzzification, renverrait un résultat dans ce cas.

La plupart des recommandations que nous avons trouvées dans la littérature est transcribable en règles d'adaptation ; pour cela, il est nécessaire d'avoir une métrique afin de caractériser les éléments de contexte, des seuils, et des actions pour ces seuils. Par exemple, la recommandation du WAI-AGE préconisant l'utilisation de police de caractères d'une taille minimale de 12-14pt pour les personnes âgées : nous avons ici une métrique (l'âge), un seuil (« personne âgée », traduit ici par un âge supérieur à 55 ans), et une action (taille de police minimale). A l'inverse, la règle 1.1.1 du WCAG spécifie que « si le contenu non textuel vise d'abord à créer une expérience sensorielle spécifique, l'équivalent textuel fournit au moins une identification descriptive de ce contenu non textuel ». A moins d'annoter le contenu des IHM avec des indicateurs d'intention, il n'est pas possible de détecter automatiquement que l'intention du concepteur est de créer une expérience sensorielle et il est donc impossible d'exprimer que l'identification descriptive doit être proposée par défaut si l'utilisateur n'est pas à même de partager cette expérience sensorielle.

Cependant, la littérature ne donne que peu de règles à respecter en cas de contexte d'usage complexe et dynamique, par exemple pour une personne ayant une combinaison de plusieurs handicaps (permanents ou situationnels), comme c'est le cas pour Bernard qui est pourtant un exemple simplifié, ne prenant en compte qu'un nombre restreint de caractéristiques. Cette question difficile a été abordée dans quelques travaux comme la thèse d'Amélie Roche [Roche A. 2015], mais, d'après ce que nous en avons vu, plutôt sous l'angle des techniques de conception d'IHM pour les polyhandicapés (et notamment le recueil de besoins) que sous l'angle de la définition de systèmes adaptatifs.

4 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté la logique booléenne et ses limites notamment en termes de gestion de l'incertitude des valeurs des caractéristiques et de complexité des règles et de leur combinatoire. Ces limites justifient l'utilisation de la logique floue, que nous utilisons dans le cadre de l'adaptation des IHM pour l'accessibilité. La prise en compte de l'incertitude des valeurs des caractéristiques permettant de se rapprocher du langage humain et d'éviter les effets de seuils, présents en logique booléenne. La gestion de la combinatoire des règles en logique floue associée à nos choix de modélisation des variables au sein de l'outil ExpressIF, notre moteur d'adaptation en logique floue, permettent quant à eux de réduire le besoin de combinaison manuelle au sein des règles. Au travers de ces deux fonctionnalités, nous nous attendons ainsi à une baisse de la complexité de la base de règles d'adaptation.

Dans un deuxième temps, nous avons présenté notre système d'adaptation des IHM pour l'accessibilité, Fuzzy4U, son architecture logicielle, et son implémentation pour des interfaces web. Nous avons en particulier décrit le moteur d'adaptation en logique floue basé sur l'outil ExpressIF, développé par CEA Tech.

Enfin, la dernière section montre comment des recommandations d'accessibilité de différentes catégories (taille de police de caractères ; niveau de contraste et gestion des couleurs ; ainsi qu'espacements entre lettres, mots, lignes et paragraphes) ont été traduites en règles

d'adaptation floues utilisables, et comment ces règles fonctionnent au sein de notre moteur d'adaptation en logique floue. Cette section se base de notre exemple fil rouge, celui de Bernard consultant un site de réservation d'hôtel, afin de montrer comment ces règles sont exploitées par notre moteur et leurs implications en termes d'adaptation finale.

Chapitre IV

Comparaison entre logique booléenne et logique floue pour l'adaptation des IHM

IV. Comparaison entre logique booléenne et logique floue pour l'adaptation des IHM

L'originalité de notre travail réside dans le fait de proposer un moteur d'adaptation en logique floue en complément d'un moteur déjà existant en logique booléenne. Dans ce chapitre, nous mettrons en avant comment la logique floue a le potentiel pour aider à résoudre les verrous que sont l'incertitude des données, la complexité des règles, ainsi que leur combinaison [Giuffrida et al. 2018]. Nous mettrons en avant ces avantages par rapport à une approche classique en logique booléenne. Afin de valider ces avantages, nous avons mené une analyse comparative entre les deux types de règles [Giuffrida et al. 2019].

1 Utilisation de la logique floue pour l'adaptation des interfaces

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, les verrous auxquels nous nous intéressons sont la couverture du contexte d'usage, l'incertitude des données, la complexité des règles, ainsi que leur combinaison. La couverture du contexte ne dépendant pas du type de règles (booléennes ou floues) choisi, elle ne sera pas abordée dans ce chapitre. C'est suivant les trois derniers aspects que nous allons étudier l'utilisation de la logique floue pour l'adaptation des interfaces et la comparer avec celle de la logique booléenne.

1.1 Incertitude

Comme abordé en section III.1, toutes les caractéristiques du contexte d'usage ont un degré d'incertitude ou d'imprécision [Dernoncourt 2011], qu'elles soient inférées par le moteur (ex : imprécision du calcul de la précision des mains grâce à un ratio entre clics valides et clics invalides) ou déclarées par l'utilisateur (ex : deux utilisateurs ayant une acuité visuelle identique pourraient chacun la définir différemment).

En logique booléenne, aucune gestion de l'incertitude n'est présente, ni dans la définition des valeurs des variables, ni, par conséquent, dans les règles d'adaptation. Par exemple, dans le projet MyUI, quatre valeurs disjointes (normal, low, veryLow et extraLow) sont définies pour l'acuité visuelle et une règle se basant sur celle-ci peut avoir la forme suivante (les valeurs nominales sont ici converties en valeurs numériques sur le domaine [0;4]) :

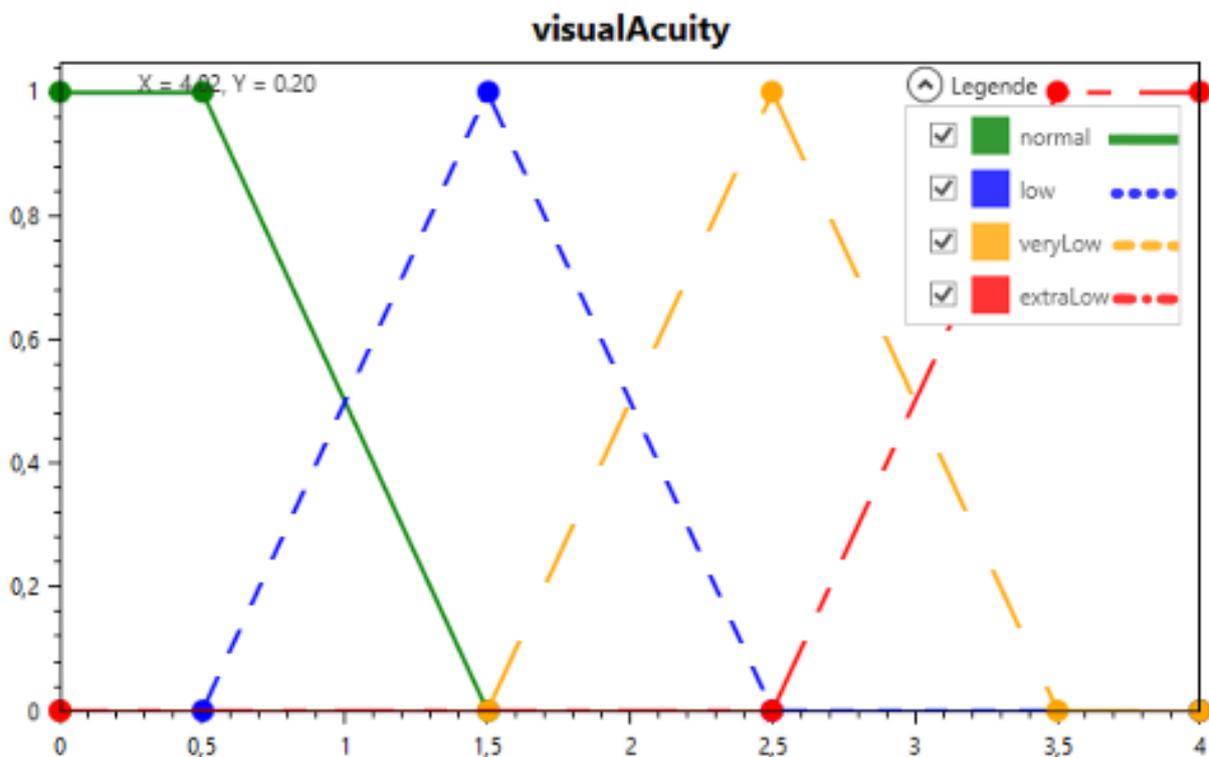
```
if          visualAcuity <= 1      then fontSize = 12;
else if     visualAcuity <= 2      then fontSize = 14;
else if     visualAcuity <= 3      then fontSize = 16;
else       fontSize = 18 ;
```

La règle ci-dessus met en place une adaptation plus ou moins importante en fonction de l'acuité visuelle de l'utilisateur, divisée en quatre états aux seuils de valeurs 1, 2 et 3 : le domaine [0;1] correspond à une acuité visuelle normale,]1;2] pour une acuité visuelle légèrement faible,]2;3] pour une acuité visuelle faible, et]3;4] pour une acuité visuelle très faible. A noter que le domaine [0;4] a été réparti entre les 4 états, mais comprend 5 valeurs entières. Nous avons donc fait le choix d'inclure au sein du premier domaine les deux premiers entiers, donnant le domaine [0;1].

Cependant, la logique booléenne implique que cette règle traite de la même façon une valeur d'entrée de 0 et de 1, correspondant toutes deux à l'état d'acuité visuelle normale, mais traite différemment une valeur de 1 et de 1,1 qui correspondent à deux états différents : en logique booléenne, toutes les valeurs sont traitées comme ayant la même certitude au sein d'un même état, et donc le même résultat, ce qui implique des effets de seuils lors du changement d'un état à un autre, avec un passage brutal d'une valeur de contexte (fontSize = 12 pour les entrées 0 et 1) à une autre (fontSize = 14 pour l'entrée 1,1).

Nous allons pouvoir utiliser les fonctions d'appartenance des variables en logique floue pour exprimer l'incertitude des différentes valeurs. Par exemple, la Figure 36 montre la définition de la variable acuité visuelle : la valeur est définie en abscisses (ici de 0 à 4), et la certitude des 4 différents états (normal, low, veryLow et extraLow) est spécifiée en ordonnées. L'état « normal » (représenté par la courbe verte) est ainsi certain lorsque l'acuité visuelle varie de 0 à 0,5 (plateau sur la courbe verte en haut à gauche). A partir de 0,5 et jusqu'à 1,5, la certitude de l'état « normal » décroît au profit de l'état « low » qui gagne en certitude (oblique de la courbe verte). A 1,5, l'état « low » (courbe bleue) a donc 100% de certitude alors que l'état « normal » est à 0%. Le croisement de 2 courbes (aux abscisses 1, 2 et 3) indique donc une probabilité de 50% pour les deux états qui se croisent.

Figure 36 : Définition de la variable linguistique visualAcuity



L'introduction de cette incertitude permet de limiter les effets de seuil, le passage d'un état à un autre se faisant de manière progressive, contrairement à la logique booléenne. De plus, cette incertitude est particulièrement utile dans la gestion des règles pour lesquelles plusieurs variables d'entrée influent sur une même variable de sortie, comme le montre la section suivante.

1.2 Complexité

Outre la prise en compte de l'incertitude, des difficultés sont liées à l'expression des règles d'adaptation. Certaines règles disposant de nombreux seuils peuvent devenir assez lourdes en logique booléenne.

Prenons comme exemple la règle se basant sur le niveau d'acuité visuelle de l'utilisateur afin d'adapter la taille de la police de caractères, présentée dans la section précédente (Figure 36). Comme nous l'avons vu, plusieurs seuils sont nécessaires (ici 1, 2, 3 et 4) et la granularité finale de la variable de sortie est relativement faible (ici 4 valeurs possibles pour la taille de police : 12, 14, 16 ou 18 pixels). Cette granularité peut être améliorée, mais uniquement au détriment du nombre de seuils à prendre en compte.

En logique floue, il est possible d'implémenter cette règle au travers de la définition des variables linguistiques d'entrée et de sortie ne comprenant que deux états (Figure 37), et la création de deux règles (Figure 38), comme nous allons le détailler ci-dessous.

Compte tenu des définitions des domaines des variables, l'adaptation de la taille de police en fonction de l'acuité visuelle de l'utilisateur en logique floue est plus simple et ne comporte que deux cas, alors que la logique booléenne en nécessitait quatre pour une granularité relativement faible.

Figure 37 : Définition des variables linguistiques visualAcuity et fontSize

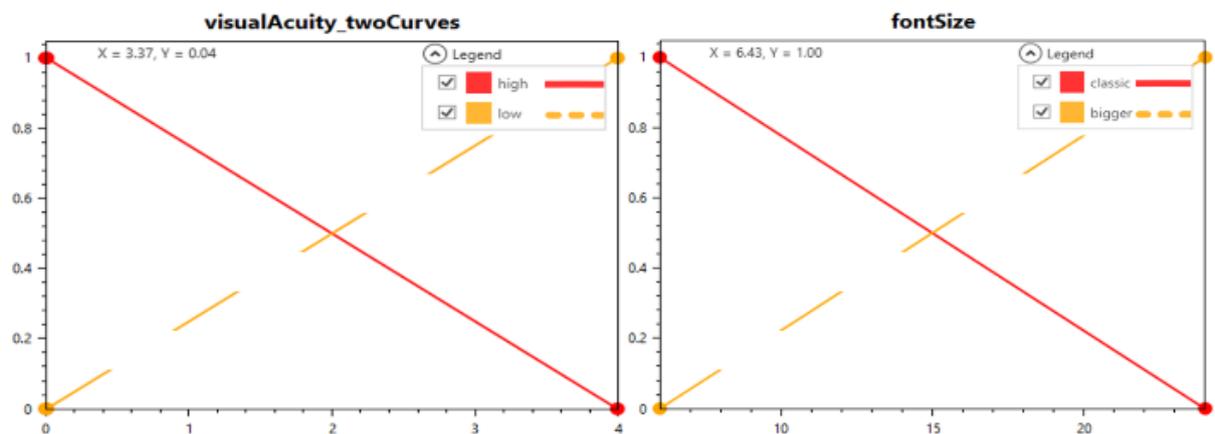


Figure 38 : Règles floues définies pour l'adaptation de la taille de police en fonction de l'acuité visuelle

If visualAcuity_fontSize is high then fontSize is classic

If visualAcuity_fontSize is low then fontSize is bigger

L'étape suivante est la défuzzification. Comme nous l'avons présenté en section III.2.2.2, nous utilisons pour cela un calcul de barycentres (ou centre de gravité) pondérés en fonction du niveau d'activation des différentes règles. En utilisant cette méthode de défuzzification, la valeur de sortie fontSize est ici comprise entre 12 et 18 points. Afin de comprendre le principe de cette méthode, deux exemples sont donnés en Figure 39 et Figure 40.

Sur la Figure 39, on peut voir que pour une acuité visuelle à 0 en entrée, le terme « high » est activé à 100% et le terme « low » à 0%. Selon la première règle, l'activation du terme de sortie

IV. Comparaison entre logique booléenne et logique floue pour l'adaptation des IHM

« classic » se fait lui aussi à 100%, représenté par l'aire rouge. Le barycentre de ce triangle rectangle est situé au premier tiers de sa base, soit une valeur de 12 pour la variable de sortie `fontSize` ayant un domaine entre 6 et 24.

Pour une acuité visuelle à 1 en entrée (Figure 40), le terme « high » est cette fois activé à 75% et le terme « low » à 25%. Cela est représenté par les deux lignes vertes et l'activation du terme de sortie « classic » à 75%, représenté par l'aire rouge et l'activation du terme de sortie « bigger » à 25%, représenté par l'aire orange striée. Les barycentres de ces deux quadrilatères sont ensuite calculés (12,3 pour le barycentre lié à « classic » et 10,071 pour celui lié à « bigger »), puis pondérés en fonction de leurs aires (respectivement 84,375 et 39,375), afin d'obtenir le résultat final de 13,5 points pour la variable `fontSize`. Nous avons ainsi l'état « bigger » qui a pris un peu plus de poids comparé à l'état « classic », donnant une taille de police de 13,5 au lieu de la valeur 12 du cas précédent. Ces résultats sont donc continus et suivent une fonction « $\text{fontSize} = 12 + \text{visualAcuity} * 1,5$ ».

Figure 39 : Schéma explicatif de la méthode de défuzzification des barycentres pondérés pour une valeur d'entrée de 0

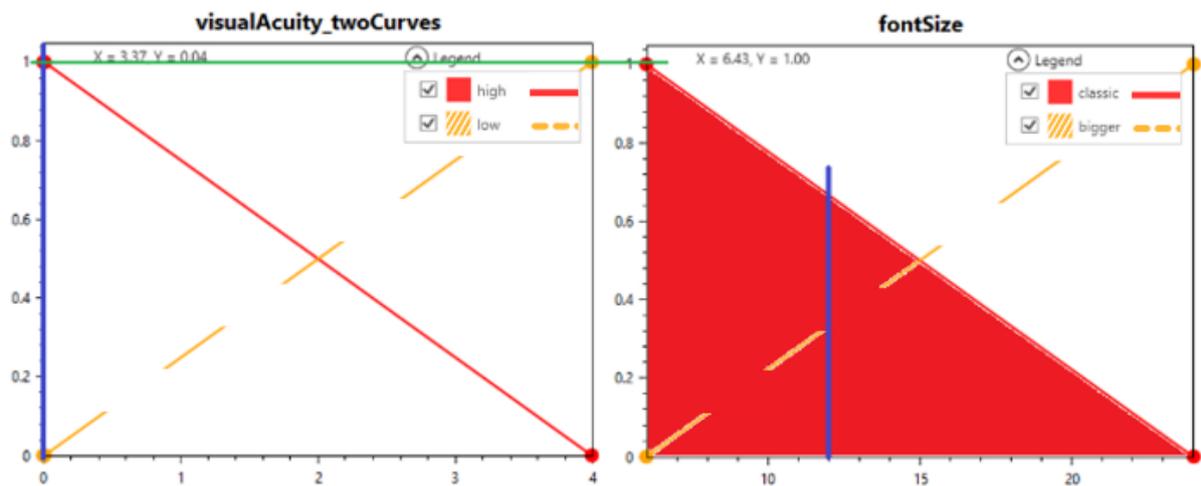
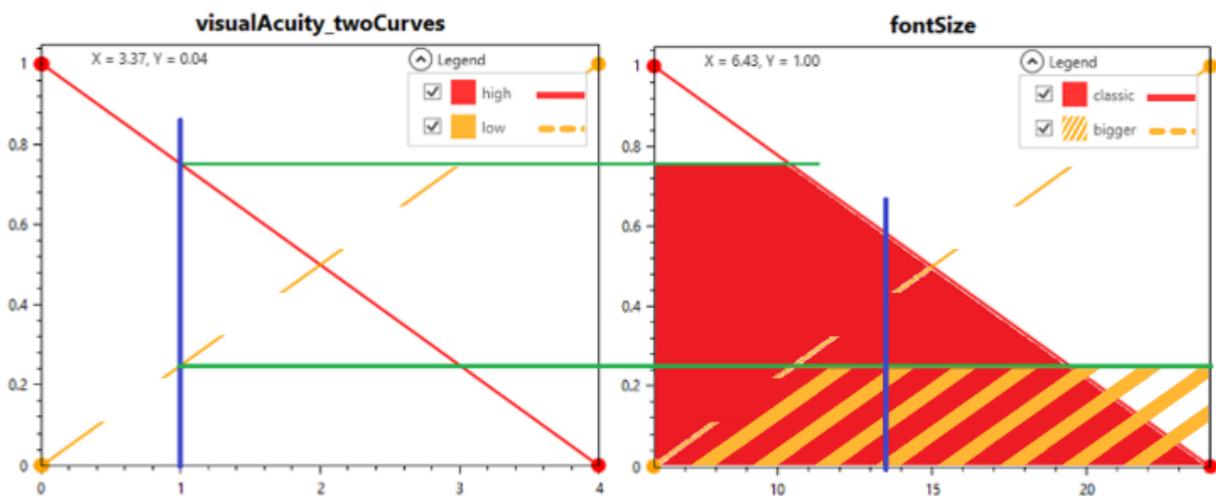


Figure 40 : Schéma explicatif de la méthode de défuzzification des barycentres pondérés pour une valeur d'entrée de 1



Cet exemple montre comment la logique floue évite les effets de seuil. Elle permet de simplifier l'expression de certaines règles d'adaptation tout en permettant d'obtenir des valeurs de sortie proportionnées à leurs entrées.

1.3 Combinaison des règles

Le dernier verrou à aborder est la combinatoire des règles survenant lorsque plusieurs variables d'entrée influent sur une même variable de sortie [Blouin et al. 2011]. Par exemple, il peut être nécessaire d'augmenter l'espace cliquable autour des interacteurs soit quand l'acuité visuelle est faible, soit quand la précision des clics (et donc des mains) est faible. Un problème se pose quand l'une des deux variables d'entrée est forte alors que l'autre est faible.

En logique booléenne, il n'y a pas de protocole permettant de définir aisément la marche à suivre dans ce cas. Il est possible de choisir l'une ou l'autre des valeurs, auquel cas il faut donc établir un système de pondération ou de priorisation des règles ; ou de faire une moyenne des valeurs, mais cela n'est valable que pour des valeurs continues et non discrètes.

La logique floue a l'avantage de gérer cela de manière intrinsèque, notamment par le biais de la gestion de l'incertitude : sans avoir un poids différent, une certitude plus importante a plus d'impact. Il reste toutefois possible de spécifier des poids au besoin.

Considérons l'exemple de la variable `clickCorrection`, permettant une prévention des erreurs de clics grâce à une augmentation de la taille de la zone de clic des interacteurs. Cela est similaire à « l'expansion de cible », décrit dans [Donghun 2012], où la cible (un interacteur) est agrandie selon le mouvement de la souris afin d'améliorer l'utilisabilité. Notre variable, `clickCorrection`, porte un nom différent car son fonctionnement n'est pas exactement le même, avec un impact sur la taille des interacteurs en fonction de la précision des mains des utilisateurs, sans prise en compte des mouvements de la souris. Notre variable se base sur l'acuité visuelle (Figure 36) et la précision des mains (dont la forme du graphique est identique à celui de la Figure 36) de l'utilisateur afin de définir un niveau plus ou moins important de correction de la taille ; la variable linguistique de sortie, `clickCorrection`, étant composée de quatre valeurs discrètes représentant quatre degrés de correction allant de `noCorrection` à `highCorrection`.

En logique booléenne, les règles utilisées pour le calcul de la variable `clickCorrection` sont les suivantes :

```
if handPrecision <= 1      then clickCorrection = noCorrection
elseif handPrecision <= 2  then clickCorrection = lowCorrection
elseif handPrecision <= 3  then clickCorrection = mediumCorrection
else clickCorrection = highCorrection;
```

```
if visualAcuity <= 1      then clickCorrection = noCorrection
elseif visualAcuity <= 2  then clickCorrection = lowCorrection
elseif visualAcuity <= 3  then clickCorrection = mediumCorrection
else clickCorrection = highCorrection;
```

En logique floue, les règles sont listées dans la Figure 41.

Figure 41 : Règles floues définies pour le calcul du clickCorrection en fonction de la précision des mains et de l'acuité visuelle

<input type="checkbox"/>	If	handPrecision	is	normal	then	clickCorrection	is	noCorrection
<input type="checkbox"/>	If	handPrecision	is	low	then	clickCorrection	is	lowCorrection
<input type="checkbox"/>	If	handPrecision	is	veryLow	then	clickCorrection	is	mediumCorrection
<input type="checkbox"/>	If	handPrecision	is	extraLow	then	clickCorrection	is	highCorrection
<input type="checkbox"/>	If	visualAcuity	is	normal	then	clickCorrection	is	noCorrection
<input type="checkbox"/>	If	visualAcuity	is	low	then	clickCorrection	is	lowCorrection
<input type="checkbox"/>	If	visualAcuity	is	veryLow	then	clickCorrection	is	mediumCorrection
<input type="checkbox"/>	If	visualAcuity	is	extraLow	then	clickCorrection	is	highCorrection

Nous pouvons constater que la formulation des règles est similaire dans les deux logiques, la différence résidant dans le fonctionnement interne de chacune des logiques.

Les 4 premières règles de chaque logique se basent sur l'état de la variable handPrecision – normal, low, veryLow, extraLow – et fournissent une valeur de sortie pour clickCorrection – allant respectivement de noCorrection à highCorrection. Les 4 dernières règles sont identiques à l'exception de la variable d'entrée qui est cette fois visualAcuity. On peut noter qu'il n'est pas nécessaire, dans l'expression de ces règles en logique floue, de se soucier de leur éventuelle contradiction ou de leur combinaison, la valeur de sortie étant déterminée par la défuzzification. Concernant la logique binaire, la résolution d'une contradiction doit être gérée par un système ad-hoc de priorisation. Au sein du moteur en logique binaire utilisé dans le cadre de cette thèse, cette priorisation est basée sur la pondération des règles. Chaque règle se voit associée à un poids afin de déterminer quelle adaptation est prioritaire dans le cas de règles concurrentes. Les poids des règles sont définis plus ou moins arbitrairement par le développeur, en se basant sur son expertise. De plus, les poids ont été définis de sorte à ce que, en cas de conflits entre plusieurs règles, ils soient tous différents et qu'il n'y ait donc pas d'ambiguïté au niveau de la règle à appliquer.

Dans l'exemple de la correction de la taille des interacteurs pour obtenir une transition lissée d'une valeur à l'autre des paramètres de sortie, nous avons opté pour la défuzzification dite des barycentres pondérés (cf. sous-section IV.1.2). Ainsi, avec une acuité visuelle à 0 et une précision des mains à 4 en entrée, le résultat est « lowCorrection ». Alors qu'une acuité visuelle à 1 et une précision des mains à 4 en entrée nous donneront une sortie « mediumCorrection ».

La logique floue gère donc la combinaison des règles d'adaptation par la défuzzification sans nécessiter la mise en place d'un algorithme spécifique de priorisation.

2 Comparaison théorique

Les règles d'adaptation de la logique floue semblent présenter des avantages par rapport à une approche classique de la logique booléenne. Afin de tester cette hypothèse, nous avons effectué une analyse comparative entre les deux types de règles, d'abord d'un point de vue théorique.

2.1 Méthode

L'analyse comparative des deux types de règles est basée sur l'expression et l'analyse des résultats des règles provenant à la fois de la littérature [Peissner et al. 2012, Moss 2009, Rello et al. 2013, Stephanidis et al. 2006, Leuteritz et al. 2009, Denic et al. 2005], et de notre propre expérience en tant que concepteurs d'IHM (par exemple clickCorrection).

Les règles ont été implémentées dans les deux moteurs d'adaptation (en logique booléenne et floue), et toutes deux intégrées dans l'architecture décrite dans le chapitre précédent. En entrée et en sortie du moteur d'adaptation, le contexte d'utilisation a été manipulé manuellement comme une variable dépendante en entrée afin de tester les différences en termes de sorties produites par les règles des deux moteurs. Toutes les valeurs pour ces caractéristiques d'entrées (utilisateur ou environnement) étaient supposées provenir soit de capteurs, soit de la saisie de l'utilisateur.

Au niveau des variables d'entrées et indépendamment de notre exemple fil rouge, nous avons effectué une sélection parmi les caractéristiques possibles, après élimination de :

(1) celles qui ne sont pas pertinentes pour l'adaptation des IHM (par exemple, le VUMS définit la caractéristique « Menton-sellion (face) length » qui mesure la distance entre le point de repère du menton et le point le plus profond de la dépression de la racine nasale, mais qui ne serait pas utile dans un calcul d'adaptation) ;

(2) celles pour lesquelles la littérature ne propose pas d'adaptation (par exemple, le VUMS définit plusieurs caractéristiques pour mesurer la flexion et l'extension possibles du pouce, tels que Thumb-Proximal Flexion, Thumb-Proximal Extension, etc., qui pourraient être pertinentes pour que les interacteurs de l'IHM soient accessibles, mais aucun auteur ne semble avoir proposé de règle d'adaptation) ;

et (3) celles qui ne permettraient pas de mesurer de différence entre les approches (par exemple, la langue de l'utilisateur, qui ne fait pas l'objet d'un calcul mais d'une application directe de la valeur dans l'interface).

Les caractéristiques gardées sont au nombre de 18, comprenant 14 caractéristiques de l'utilisateur et 4 caractéristiques décrivant l'environnement. Les caractéristiques de l'utilisateur décrivent :

- l'âge de l'utilisateur,
- la précision des mains,
- l'acuité visuelle,
- la compréhension du langage,
- la compréhension des signes abstraits,
- le niveau d'attention,
- les tremblements,

- la dyslexie,
- le daltonisme ("protanopie", "deutéranopie", "tritanopie" ou "achromatie"),
- l'expérience informatique,
- et l'expérience avec le site web utilisé en particulier.

Les quatre caractéristiques d'entrée environnementales expriment la luminosité de la pièce, ainsi que le matériel utilisé en termes d'orientation et de surface d'affichage (hauteur et largeur de la fenêtre).

Ces entrées ont ensuite été exploitées par des règles d'adaptation produisant les valeurs de 17 paramètres de sortie agissant sur l'interface : espacement entre les lettres, les mots ou les lignes, police et taille de la police, alignement du texte, quantité de texte, présence ou absence d'animations ou d'éléments purement décoratifs, zone de taille des clics des interacteurs, contraste, changement des couleurs, utilisation de liens hypertextes ou remplacement par des boutons, modes d'affichage du menu (icône ou texte), ordre des listes à puces, niveaux de guidage et de confirmation.

Il y avait 34 règles d'adaptation en logique booléenne, et 81 en logique floue. Cette différence s'explique principalement par notre choix d'écriture des règles en logique floue, où une règle en logique booléenne se traduit par plusieurs règles en logique floue. Les règles en logique booléenne utilisent une structures if... then... else if... alors que les règles en logique floue sont de la forme if... then..., le « else if » étant remplacé par la création d'une nouvelle règle.

2.2 Les règles comparées

Pour comparer les règles en logiques booléenne et floue, nous allons utiliser l'exemple du site de réservation d'hôtel de notre exemple fil rouge, introduit en section I.3.

Cinq groupes de règles ont été sélectionnés pour cette expérience afin de mettre en avant les différences de résultats entre logique binaire et logique floue, et permettre ainsi une comparaison. Quatre des groupes de règles sélectionnés dépendent d'entrées multiples, pour lesquelles nous avons émis l'hypothèse que la logique floue permettrait une meilleure adaptation (voir section IV.1 .3). Le cinquième groupe de règles dépend d'une seule entrée, mais il correspond à l'exemple donné en section IV.1.2, où nous montrions que la logique floue avait divers avantages lors de l'adaptation de la taille de police en fonction de l'acuité visuelle (écriture de règle simplifiée, pour une granularité du résultat améliorée).

2.2.1 Mode d'affichage

Le premier groupe de règles est chargé de calculer la variable "mode d'affichage", qui correspond à l'utilisation d'icônes, en plus du texte, dans les menus (Figure 42 et Figure 43). Le calcul est basé sur trois caractéristiques : "expérience du site web", "compréhension des signes abstraits" et "réception du langage" qui représentent respectivement le niveau de connaissance de l'utilisateur du site web actuel, sa capacité à comprendre les symboles/icônes et sa capacité à comprendre le langage écrit.

Figure 42 : Menus avec texte et icônes

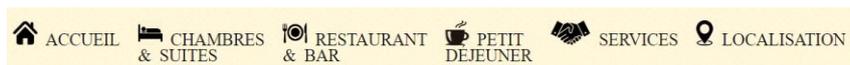


Figure 43 : Menus avec seulement du texte



2.2.2 Niveau de verbosité

Le deuxième groupe de règles est utilisé pour calculer le niveau de "verbosité" du site web (c'est-à-dire la quantité de texte présentée à l'utilisateur). Par défaut, le texte est dans sa version standard, complète (Figure 44), et il peut être plus ou moins résumé selon les caractéristiques de l'utilisateur (Figure 45). Ces règles dépendent de deux caractéristiques : la "réception de la langue" (capacité à comprendre la langue écrite) et le niveau d'"attention" de l'utilisateur (c'est-à-dire son niveau de concentration).

Figure 44 : Présentation Standard et complète (verbosité par défaut)

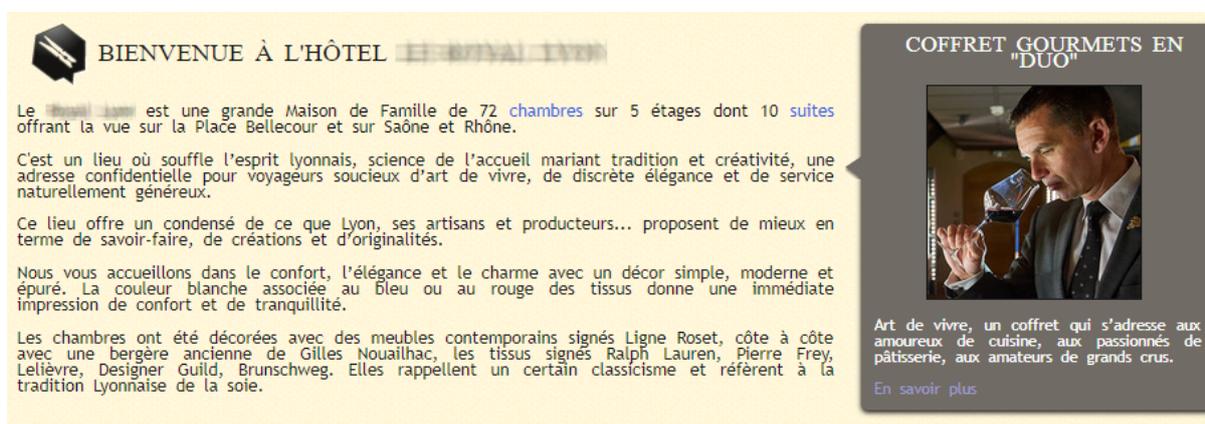
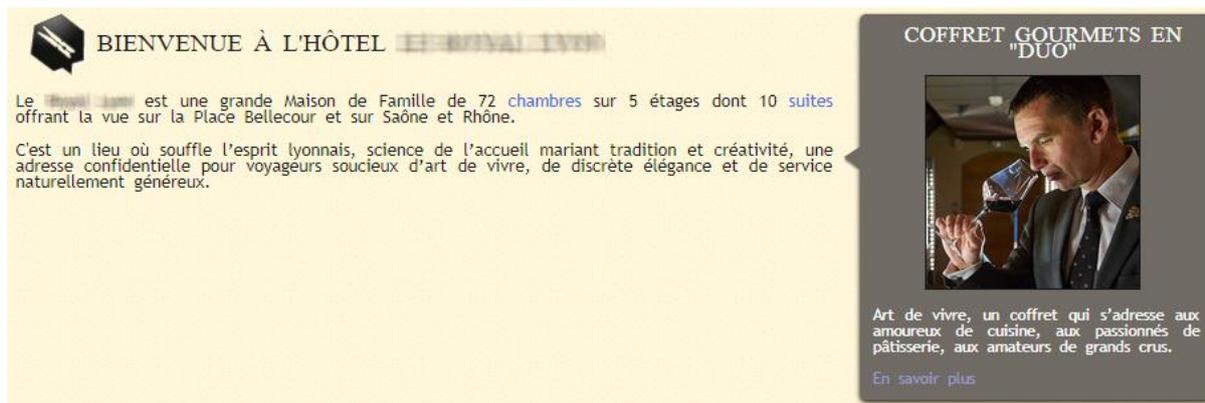


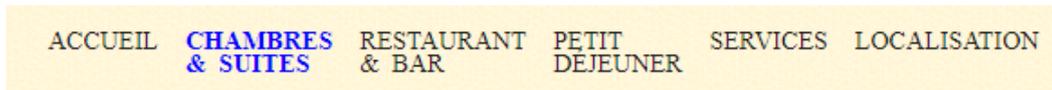
Figure 45 : Présentation courte (verbosité concise)



2.2.3 Niveau de guidage

Le groupe de règles suivant calcule le "niveau de guidage" à mettre en œuvre dans l'interface (standard ou élevé) à partir de deux caractéristiques d'entrée : l'"expérience informatique" (avec les ordinateurs et le web en général) et l'"expérience du site web" (avec ce site web particulier). La Figure 46 montre un exemple de niveau de guidage élevé dans les menus, avec la mise en avant du lien « Chambres & Suites », permettant d'effectuer une réservation.

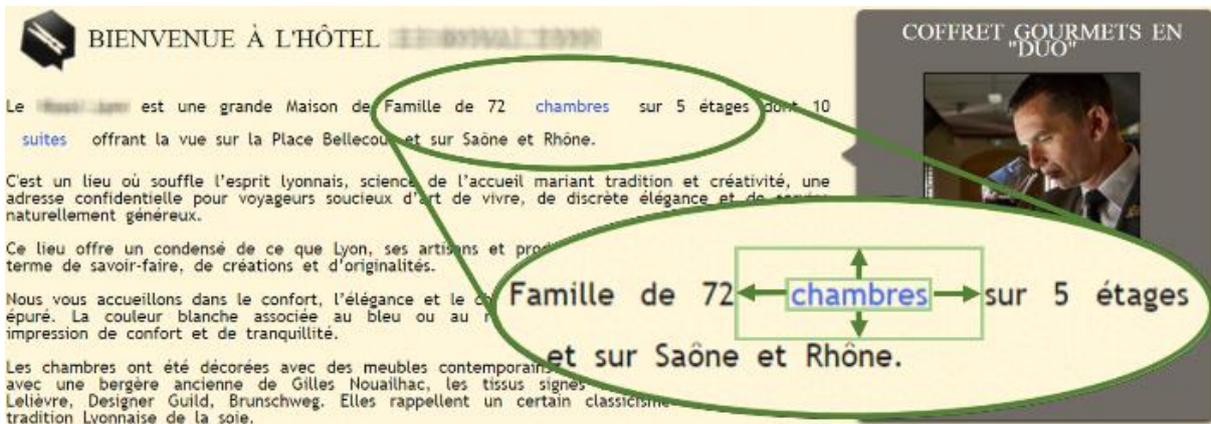
Figure 46 : Menu avec un haut niveau de guidage



2.2.4 Correction des clics

Ce quatrième groupe est chargé de calculer la variable clickCorrection, correspondant à une prévention des erreurs de clics, et se traduisant par un agrandissement de la zone de clics des interacteurs, c'est-à-dire la taille de la zone autour d'un interacteur dans laquelle un clic est associé à l'interacteur (Figure 47). Cette variable a été calculée à partir de l'"acuité visuelle" de l'utilisateur, ainsi que de la "précision de ses mains" (mouvement de la souris et des clics). Ce groupe de règles a été utilisé afin de rattraper les clics imprécis, ayant été effectués par erreur juste à côté d'un interacteur.

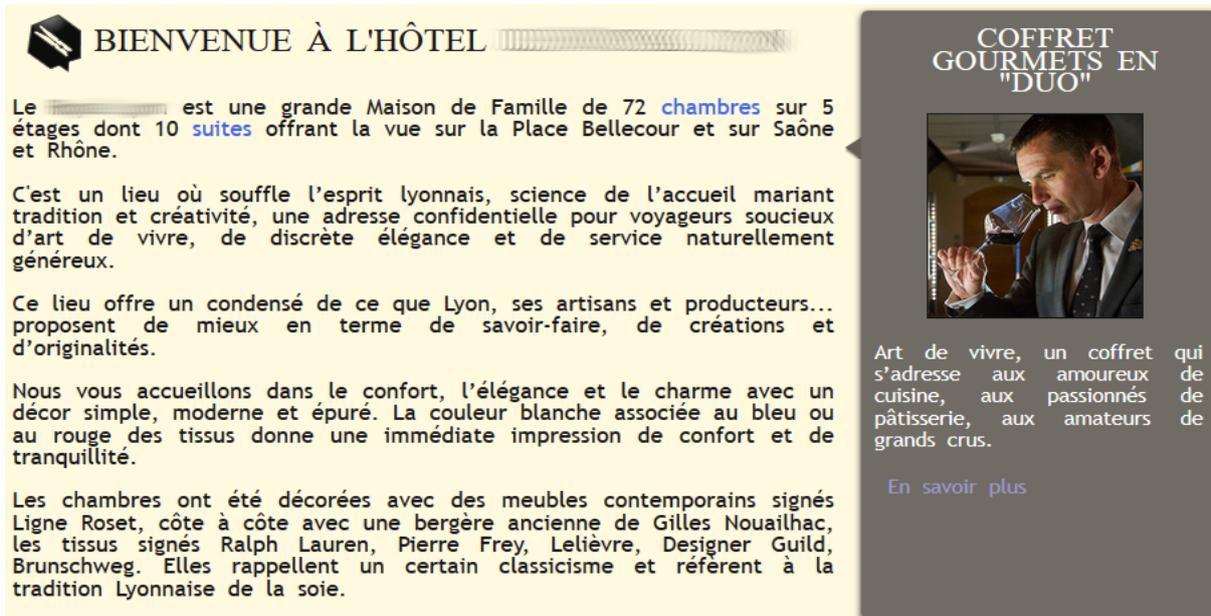
Figure 47 : Interacteurs avec des zones de clics étendues (correction haute)



2.2.5 Taille de la police

La dernière règle concerne l'augmentation de la taille des caractères, en fonction de l'acuité visuelle de l'utilisateur (voir Figure 48 et voir section IV.1.2 pour les détails).

Figure 48 : Agrandissement de la taille de police de caractères



2.3 Résultats

Nous résumons dans le Tableau 2 les résultats de l'adaptation des règles en logique booléenne et en logique floue. Le tableau peut être lu comme suit : la première colonne du tableau (situations d'entrée) est subdivisée en deux sous-colonnes. La première sous-colonne détaille l'ensemble des caractéristiques ayant un impact sur la même variable de sortie. La deuxième sous-colonne définit des exemples de valeurs correspondant respectivement à chacune des variables d'entrée, sur le domaine [0,4], où 0 est une absence de handicap et 4 un niveau élevé de ce handicap. Par exemple, la première situation d'entrée du tableau est un utilisateur ayant un ensemble de valeurs de 1/2/2 pour les variables d'entrée énumérées : websiteExperience (valeur de 1, correspondant à un niveau légèrement faible), abstractSignsUnderstanding (2 – niveau faible) et languageReception (2 – niveau faible). Les deux colonnes suivantes précisent les résultats obtenus pour toutes les situations d'entrées grâce à la logique booléenne et la logique floue.

Une sélection a été effectuée parmi la multitude des différents ensembles de valeurs d'entrée possibles pour chacune des situations (sous-colonne « Valeurs » du tableau), afin de garder un échantillon représentatif. Certaines situations d'entrée n'entraînent pas de différence en termes de résultats entre logique booléenne et logique floue, comme par exemple lorsque les caractéristiques ont soit toutes un bon niveau ou soit toutes un faible niveau. Les règles ont donc été sélectionnées afin de mettre en avant les différences de traitement entre les logiques, notamment au travers de situations comprenant des variables ayant à la fois un bon niveau et d'autres variables ayant un faible niveau.

Tableau 2 : Synthèse de l'analyse théorique comparative entre logique booléenne et logique floue

N°	Situations d'entrée		Résultats en logique booléenne	Résultat en logique floue
	Variables d'entrée	Valeurs		
G1	websiteExperience	1/2/2	displayMode = textOnly	
	abstractSignsUnderstanding	1/2/3	displayMode = textOnly	displayMode = textAndGraphics
	languageReception	1/4/4	displayMode = textOnly	displayMode = textAndGraphics
		3/3/3	displayMode = textAndGraphics	
G2	languageReception	1/1	verbose = thorough	
	attention	1/2	verbose = thorough	verbose = summarized
		1/3	verbose = thorough	verbose = concise
		3/4	verbose = concise	verbose = laconic
G3	itExperience	1/1	guidanceLevel = medium	
	websiteExperience	1/3	guidanceLevel = medium	guidanceLevel = high
		3/3	guidanceLevel = high	
G4	visualAcuity	1/1	clickCorr. = noCorrection	
	handPrecision	0/1,5	clickCorr. = noCorrection	
		1/2,5	clickCorr. = noCorrection	clickCorr. = lowCorrection
		0/3,5	clickCorr. = noCorrection	clickCorr. = lowCorrection
		2/3	clickCorr. = lowCorrection	clickCorr. = mediumCorrection
		3/3	clickCorr. = mediumCorrection	
		2,5/4	clickCorr. = mediumCorrection	clickCorr. = highCorrection
G5	visualAcuity	0	fontSize = 12	
		0,5	fontSize = 12	fontSize = 12,75
		1	fontSize = 12	fontSize = 13,5
		1,5	fontSize = 14	fontSize = 14,25
	

Les différences de résultats en logique booléenne et en logique floue, pour une même situation d'entrée, permettent de mettre en évidence deux points :

a) Pour les règles définies avec une complexité similaire entre la logique booléenne et la logique floue (c'est-à-dire les règles écrites de la même manière dans les deux logiques, concernant les groupes de règles **G1** à **G4**), il nous semble que la logique floue permet d'obtenir des résultats plus pertinents par rapport aux situations d'entrée, sans avoir à définir et à utiliser un système de pondération entre les règles, comme c'est le cas pour la logique booléenne. Par exemple, la valeur calculée du `DisplayMode` (groupe de règle **G1**) est identique en logique booléenne et en logique floue pour la première et la quatrième situation, c'est-à-dire lorsque les trois valeurs d'entrée sont soit toutes plutôt basses soit toutes plutôt hautes. Cependant, lorsque les valeurs d'entrée fournies sont hétérogènes (deuxième et troisième situations), la logique floue renvoie une valeur moyenne, qui nous semble mieux correspondre aux besoins des utilisateurs concernés. Cela est particulièrement remarquable pour les résultats du **G2**, le deuxième groupe de règles (adaptation de la verbosité en fonction des niveaux de réception au langage et d'attention), où la variable de sortie `verbose` peut prendre quatre états ("thorough", "summarized", "concise" et "laconic"), soit une plage allant du texte complet (qui équivaut à aucune adaptation) jusqu'à un texte réduit au maximum. En effet, lorsque la valeur de l'une des variables d'entrée varie d'un extrême à l'autre, les résultats de la logique floue montrent que la valeur finale est lissée, en passant par toutes les valeurs intermédiaires, ce qui n'est pas le cas en logique booléenne, car celle-ci implique de définir des poids pour chaque règle. Ainsi, dans un groupe de règles en logique booléenne, seule la variable ayant la plus forte priorité impactera le résultat final. Par exemple, dans notre moteur en logique booléenne, l'adaptation de la quantité de texte affichée à l'utilisateur (correspondant à notre variable « `verbose` ») se base sur deux variables d'entrée, la réception au langage et le niveau d'attention de l'utilisateur. Ici, la règle se basant sur la réception au langage a la priorité la plus forte, ce qui implique que seules les valeurs de la variable de réception au langage soient prises en compte et entraîne un manque de nuance des valeurs de sortie.

b) Comme c'est le cas pour l'adaptation de la taille de la police en fonction de l'acuité visuelle (dernière ligne du tableau), la logique floue permet d'obtenir facilement une granularité extrêmement fine par rapport à la logique booléenne. Cette dernière pourrait permettre d'obtenir une telle granularité, mais cela se ferait au détriment du nombre de seuils à gérer dans la règle. En outre, il est important de noter qu'en logique floue, cette granularité ne se limite pas aux exemples du tableau : une valeur de `visualAcuity` de 0,25 aura une sortie de `fontSize` de 12,375, et ainsi de suite. On peut questionner la pertinence d'une telle finesse de la variable de sortie étant donné qu'une différence si légère en terme de taille de police sera difficilement perceptible par l'utilisateur. Toutefois, cette granularité aide à éviter des effets de seuils perceptifs, qui pourraient se révéler gênants pour les utilisateurs.

Cette analyse comparative tend à montrer que la logique floue permet d'obtenir des résultats plus cohérents, avec une granularité plus fine, sans avoir à gérer la combinaison de plusieurs règles, étant donné que celle-ci est gérée intrinsèquement par la logique floue (voir section IV.1.3). En complément de cette analyse théorique, nous avons cherché à obtenir un retour plus qualitatif en réalisant une expérimentation auprès d'experts.

3 Comparaison basée sur des avis d'experts

3.1 Protocole expérimental

Notre hypothèse est que la logique floue a le potentiel pour calculer des adaptations plus pertinentes que la logique booléenne pour certaines règles d'adaptation des IHM. Nous avons testé cette hypothèse en menant des entretiens avec des experts en IHM. Ces entretiens ont également servi à la génération d'idées pour l'amélioration des règles ou les utilisations pratiques de la logique floue.

Nous avons souhaité effectuer un entretien auprès de huit experts pour cette évaluation, car, comme l'ont montré Nielsen & Mack [Nielsen et al. 1994], huit experts généralistes suffisent pour détecter plus de 90% des problèmes d'utilisabilité. Dans notre cas, les experts généralistes recherchés étaient des participants spécialistes des IHM et ayant plusieurs années d'expérience.

Les entretiens ont ainsi été réalisés auprès de huit experts, six hommes et deux femmes, âgés de 37 à 57 ans. Ils étaient tous maîtres de conférences ou professeurs en IHM, travaillant en France (Paris, Nice, Grenoble, Valenciennes) depuis plus de dix ans. Les entretiens ont duré en moyenne 40 minutes et se sont déroulés en novembre 2018.

Lors de l'entretien, le Tableau 3 était fourni et présenté aux experts comme suit : la première colonne du tableau, « Situations d'entrée », est subdivisée en deux sous-colonnes. La première sous-colonne détaille l'ensemble des caractéristiques ayant un impact sur la même variable de sortie. La deuxième sous-colonne définit des exemples de valeurs correspondant respectivement à chacune des variables d'entrée. Par exemple, la première situation d'entrée du tableau est un utilisateur ayant un ensemble de valeurs de 1, 2 et 2 (1/2/2 dans le tableau) pour les variables d'entrée énumérées : `websiteExperience` (valeur de 1), `abstractSignsUnderstanding` (2) et `languageReception` (2). La colonne suivante, « Sortie », détaille la variable de sortie impactée par la ou les variables d'entrées. Par exemple, pour la première situation d'entrée, les variables `websiteExperience`, `abstractSignsUnderstanding` et `languageReception` impactent la variable de `displayMode` qui peut prendre une des valeurs listées (`textOnly` ou `textAndGraphics`), la valeur en gras et soulignée étant celle définie par défaut et correspondant à une absence d'adaptation. Enfin, la dernière colonne permettait aux experts de donner un résultat pour chaque situation d'entrée, et de donner un commentaire s'ils le souhaitaient.

Les différentes situations d'entrées ont été détaillées et les différentes variables ont été définies et explicitées par le biais d'exemples afin d'éviter toute mauvaise interprétation. Les exemples présentés oralement aux experts se basaient sur le site web de réservation d'hôtel, et étaient complétés par des captures d'écran des différentes adaptations relatives aux règles (par exemple avec une plus grande taille de police, ou avec des textes réduits pour le cas du niveau de verbose, voir les Figure 44 à Figure 48). Il leur a ensuite été demandé de préciser ce qu'ils recommanderaient comme résultat d'adaptation pour chaque situation d'entrée figurant dans le Tableau 3, sous la forme d'une liste de choix correspondant aux valeurs possibles de la sortie. Le tableau était complété par l'expert ou par l'enquêteur, au choix de l'expert, et des commentaires étaient notés par l'enquêteur. Suite à chaque groupe des règles, il a été demandé aux experts d'expliquer leurs choix lors d'une phase de libre expression propre à ce groupe de règle (colonne « Réponse / Commentaire » du tableau).

IV. Comparaison entre logique booléenne et logique floue pour l'adaptation des IHM

Tableau 3 : Tableau fourni aux experts

Situations d'entrée		Sortie	Réponse / Commentaire
Variables d'entrée	Valeurs d'entrée (domaine de 0 à 4)		
ictExperience abstractSignsUnderstanding languageReception [G1]	1/2/2 – Pour un utilisateur ayant les 3 caractéristiques de légèrement faible à faible	DisplayMode 1. textOnly 2. textAndGraphics	
	1/2/3 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique légèrement faible , une faible et une très faible		
	1/4/4 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique légèrement faible , et deux autres au niveau minimal		
	3/3/3 – Pour un utilisateur ayant les 3 caractéristiques à un niveau faible		
languageReception attention [G2]	1/1 – Pour un utilisateur ayant les deux caractéristiques à un niveau légèrement faible	Verbose 1. thorough 2. summarized 3. concise 4. laconic	
	1/2 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un bon niveau et une à un niveau faible		
	1/3 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un niveau légèrement faible et une à un niveau très faible		
	3/4 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un niveau très faible et une à un niveau minimal		
itExperience ictExperience [G3]	1/1 – Pour un utilisateur ayant les deux caractéristiques à un niveau légèrement faible	GuidanceLevel 1. classic 2. high	
	1/3 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un niveau légèrement faible et une à un niveau très faible		
	3/3 – Pour un utilisateur ayant les deux caractéristiques à un niveau très faible		
visualAcuity handPrecision [G4]	1/1 – Pour un utilisateur ayant les deux caractéristiques à un niveau légèrement faible	ClickCorrection 1. noCorrection 2. lowCorrection 3. mediumCorrection 4. highCorrection	
	0/1,5 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un bon niveau, et une à un légèrement faible niveau		
	1/2,5 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un niveau légèrement faible , et une faible		
	0/3,5 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un bon niveau et une à un niveau faible		
	2/3 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un niveau faible , et une à un niveau très faible		
	3/3 – Pour un utilisateur ayant les deux caractéristiques à un niveau très faible		
	2,5/4 – Pour un utilisateur ayant une caractéristique à un niveau faible , et une à un niveau minimal		
visualAcuity [G5]	0 (Aucun problème de vue)	FontSize de 12 à 18pts (ou 100% et +)	
	1		
	2		
	3		
	4 (acuité visuelle minimale)		

Une fois les réponses données pour les 5 groupes de règles (**G1** à **G5**) du Tableau 3, un avis global a été recueilli sous la forme d'une expression libre, et suivi par une discussion ouverte sur les règles et les logiques testées. A cette étape, l'objectif principal était de comprendre plus précisément les choix des experts, et si ceux-ci trouvaient qu'une des logiques était plus adaptée que l'autre. Un second objectif était d'avoir des retours concernant les règles elles-mêmes et leur gestion.

3.2 Réponses des experts et méthode d'analyse

Les préconisations des experts pour chaque situation sont présentées dans le Tableau 4 et le Tableau 5 ci-dessous. Ces tableaux se lisent comme suit : les différents groupes de règles **G1** à **G3**, puis **G4** à **G5**, sont présentés verticalement. Horizontalement, les premières lignes présentent un rappel de la variable de sortie, des valeurs possibles de sortie, des différentes situations d'entrée puis les résultats théoriques de la logique binaire et de la logique floue. Sont ensuite présentées les réponses des huit experts. Les valeurs numériques dans les tableaux correspondent aux valeurs de sortie possibles ou préconisées, et listées sur la troisième ligne, « Valeurs possibles de sortie ». Certains experts ayant parfois indiqué une plage de valeurs de sortie pour une situation particulière, nous avons indiqué cela en mettant les valeurs entre crochet (par exemple : [1-2] pour les sorties des groupes **G1** et **G2**).

Tableau 4 : Réponses des experts - Groupes de règles **G1** à **G3**

Groupe de règles	G1				G2				G3		
Variable de sortie	DisplayMode				Verbose				GuidanceLevel		
Valeurs possibles de sortie	1 = textOnly 2 = textAndGraphics				1 = thorough 2 = summarized 3 = concise 4 = laconic				1 = medium 2 = high		
Situations d'entrée	1/2/2	1/2/3	1/4/4	3/3/3	1/1	1/2	1/3	3/4	1/1	1/3	3/3
Résultat en logique binaire	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	2
Résultat en logique floue	1	2	2	2	1	2	3	4	1	2	2
Expert 1	2	2	2	2	1	2	3	4	1	1	2
Expert 2	2	2	2	2	1	1	2	3	1	[1-2]	2
Expert 3	2	2	2	2	1	2	[3-4]	4	1	[1-2]	2
Expert 4	1	1	2	2	[1-2]	[1-2]	[2-3]	4	1	[1-2]	2
Expert 5	1	[1-2]	[1-2]	2	1	[1-2]	[2-3]	[3-4]	1	[1-2]	2
Expert 6	2	2	2	2	1	1	2	[3-4]	1	1	2
Expert 7	2	2	2	2	1	2	3	4	1	1	2
Expert 8	2	2	2	2	1	[2-3]	[2-3]	4	2	2	2

Tableau 5 : Réponses des experts - Groupes de règles G4 et G5

Groupe de règles	G4							G5				
Variable de sortie	clickCorrection							fontSize				
Valeurs possibles de sortie	1 = noCorrection 2 = lowCorrection		3 = mediumCorrection 4 = highCorrection					FontSize de 12 à 18pts				
Situations d'entrée	1/1	0/1,5	1/2,5	0/3,5	2/3	3/3	2,5/4	12	12	14	16	18
Résultat en logique binaire	1	1	1	1	2	3	3	12	12	14	16	18
Résultat en logique floue	1	1	2	2	3	3	4	12	13,5	15	16,5	18
Expert 1	1	2	4	4	4	4	4	12	12	12	12	18
Expert 2	1	1	2	2	[2-3]	[3-4]	[3-4]	12	12	12	15	18
Expert 3	1	2	3	4	3	3	4	12	18	18	24	24
Expert 4	1	2	3	4	3	3	4	12	12	14	16	18
Expert 5	1	1	2	3	3	4	4	12	13	14	17	18
Expert 6	1	1	[1-2]	2	[2-3]	3	4	11	12	14	16	18
Expert 7	2	2	2	3	3	4	4	12	12	12	14	18
Expert 8	1	1	[2-3]	4	4	4	4	12	14	14	16	18

Pour analyser ces résultats, nous avons commencé par vérifier la cohérence entre les réponses d'experts en testant une hypothèse H0 : « la distribution des réponses pour chaque groupe de règles est la même entre les experts », ce qui traduit une population homogène et donc des réponses convergentes entre experts. Pour les quatre premiers groupes, l'hypothèse H0 a été testée avec un test de Kruskal-Wallis ordinal car nous avons plus de deux échantillons indépendants (les experts) et des réponses ordinales. Lorsque les experts ont renseigné deux réponses, nous avons ici utilisé la moyenne des deux valeurs ; par exemple, dans le Tableau 4, l'expert n°8 a répondu à la deuxième situation du groupe G2 avec les valeurs 2 et 3 ([2-3] dans le tableau), et nous avons ici 2,5 pour notre test. Pour le cinquième groupe, dont les valeurs possibles étaient continues, H0 pouvait être testée avec une analyse de la variance (Anova).

Ces deux tests ont des fonctionnements similaires : ils permettent de calculer une variable nommée valeur-p, qui est la probabilité que l'hypothèse H0 ne puisse pas être rejetée pour le groupe de règles considéré. Cette variable a une valeur comprise entre 0 et 1, et on considère que H0 ne peut pas être rejetée lorsque la valeur-p est supérieure à 0,025.

Une fois établie l'hypothèse de la convergence entre les réponses des experts par groupe de règles, nous avons cherché à évaluer si ces réponses se rapprochaient plutôt des résultats théoriques de la logique binaire ou de ceux de la logique floue.

Pour les groupes de règles G1 à G4 qui avaient des réponses possibles ordinales, nous avons choisi de comptabiliser le nombre de réponses d'experts correspondant aux résultats théoriques en logique binaire d'un côté, et correspondant aux résultats théoriques en logique floue d'un autre côté, puis de comparer ces deux valeurs afin de déterminer de quel type de logique se rapprochent les avis d'experts.

Etant donné que certains experts ont parfois renseigné deux réponses pour une situation d'entrée (par exemple, dans le Tableau 4, la réponse de l'expert n°8 à la deuxième situation du

groupe **G2**), nous avons commencé par comptabiliser les réponses d'experts uniques, auxquelles nous avons ajouté les réponses d'experts doubles pouvant être rapprochés d'une logique en particulier. Par exemple si, pour une situation d'entrée, les résultats théoriques de la logique binaire et de la logique floue sont respectivement les réponses 1 et 2, et que l'expert a répondu [2-3], la réponse sera en faveur de la logique floue, qui est plus proche (voir Tableau 4, groupe **G2**, deuxième situation d'entrée, expert n°8). A l'inverse, si les résultats théoriques de la logique binaire et de la logique floue sont respectivement les réponses 1 et 2, et que l'expert a répondu [1-2], la réponse n'a pas été comptabilisée car nous ne pouvons savoir si sa réponse tendait plus vers l'un ou l'autre des résultats (voir Tableau 4, groupe **G2**, deuxième situation d'entrée, experts n°4 et 5).

Ce système de comptage a été préféré à un calcul de distance en raison de la difficulté à calculer une distance entre réponse d'expert et résultat théorique lorsque la réponse d'un expert était double pour une situation d'entrée.

Concernant le dernier groupe de règles, **G5**, étant donné que les réponses étaient non pas ordinales mais continues, nous avons ici calculé les distances entre les réponses d'experts et les résultats théoriques en logique binaire d'un côté et en logique floue de l'autre. Une de ces distances correspond à la différence entre la réponse d'un expert à une situation d'entrée et le résultat théorique d'une des logiques ; par exemple, dans le cas où le résultat en logique binaire est de 12 et qu'il est de 13.5 pour la logique floue (groupe **G5**, deuxième situation d'entrée), si l'expert a répondu 14, cela se traduit par une distance de 0.5 avec le résultat en logique floue ($14 - 13.5$) et d'une distance de 2 avec le résultat en logique binaire ($14 - 12$). Une moyenne des distances a ensuite été calculée, ainsi qu'un écart-type des distances, afin d'analyser la proximité à l'une ou l'autre des logiques.

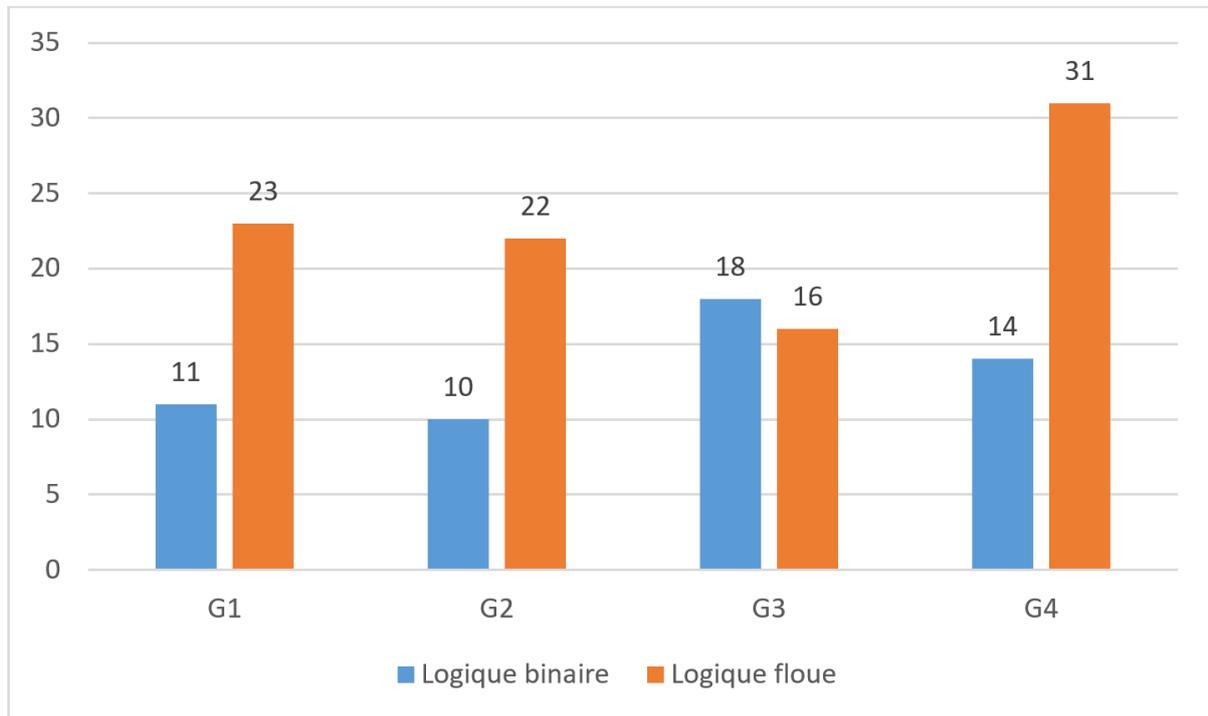
3.3 Résultats globaux

Les résultats de ces tests seront analysés dans les sections suivantes pour chaque groupe de règles. Les groupes **G1** à **G5** ont obtenu des valeurs-p respectives de 0,99, 0,92, 0,99, 0,98 et 0,13, ce qui validait l'hypothèse H_0 pour ces cinq groupes.

L'hypothèse de la convergence entre les réponses des experts étant établie pour les cinq groupes de règles, nous avons cherché à évaluer de quelle logique pouvaient se rapprocher ces réponses, au travers de (1) un comptage du nombre de réponses d'experts coïncidant avec les réponses théoriques de la logique binaire d'un côté et de la logique floue de l'autre pour les groupes **G1** à **G4**, et (2) un calcul de l'écart-type des distances entre les réponses d'expert et les résultats théoriques des deux logiques pour le groupe **G5**. Ces résultats sont analysés par groupe de règles dans la section suivante.

La Figure 49 présente le nombre total de réponses d'experts correspondant à l'une ou l'autre des logiques, pour les groupes **G1** à **G4**. Cet histogramme montre des résultats significativement plus importants pour la logique floue au niveau des groupes **G1**, **G2** et **G4** (respectivement 12, 12 et 17 réponses d'écart), et des résultats équivalents pour le groupe **G3** (seulement deux réponses d'écart).

Figure 49 : Histogramme présentant le nombre de réponses d'experts identiques ou assimilées à chaque logique



Enfin, les résultats du comptage pour les groupes **G1** à **G4** et des moyennes de distance et des écarts-types pour le groupe **G5** ont été confrontés aux explications et compléments apportés par les experts dans la phase d'entretien, présentés dans la section suivante, et ont été utilisés pour représenter l'adhésion des experts aux résultats de la logique floue avec une échelle de Likert à trois degrés, que nous détaillerons après analyse de chaque groupe de règles.

3.4 Analyse des résultats par groupes de règles

3.4.1 Groupe de règles G1 : DisplayMode

Pour ce premier groupe de règles, **G1**, la valeur-p est de 0,99 traduisant une population homogène et donc que les avis d'experts convergent. Les résultats du comptage de nombre de réponses d'experts assimilables à une logique étaient de 11 réponses pour la logique binaire, contre 23 pour la logique floue, et 2 réponses doubles qui n'ont pu être rapprochées d'aucune logique. A noter que certaines réponses d'experts peuvent être comptabilisées pour les deux logiques à la fois, lorsque les résultats théoriques en logique binaire et floue sont identiques (par exemple dans le cas de la première situation d'entrée de ce groupe de règle **G1**).

Cependant, ces résultats ne traduisent pas la réalité qui était que les experts n'étaient pas d'accord avec la règle elle-même comme l'a montré la discussion avec les experts. En effet, six des huit experts ont recommandé l'utilisation permanente d'icônes en plus du texte dans les menus (soit un mode textAndGraphics permanent) en contradiction avec les recommandations de MyUI [Peissner et al. 2012, Stephanidis et al. 2006, Leuteritz et al. 2009], à partir desquelles la règle d'adaptation a été établie. Les recommandations de la littérature considèrent plutôt les icônes comme un moyen de compensation de difficulté ou de facilitation de lecture. Elles préconisent ainsi de mobiliser les icônes lorsque l'utilisateur présente une faiblesse (valeur d'entrée comprise

entre 2 et 4) dans au moins l'une des deux variables d'entrée suivante, `websiteExperience` et `languageReception`, et présente un bon niveau sur la troisième variable d'entrée, `abstractSignsUnderstanding` (valeur d'entrée comprise entre 0 et 2) ; et elles préconisent de les éviter lorsque l'utilisateur n'a pas de telle faiblesse sur les deux premières variables d'entrée (valeurs d'entrée comprises entre 0 et 2). Ce résultat peut difficilement être interprété du point de vue de la comparaison entre les deux logiques car il remet en cause la règle elle-même.

Un septième expert a également exprimé son désaccord avec la règle au niveau des variables d'entrée, indiquant qu'elle ne devrait prendre en compte que le "`abstractSignsUnderstanding`".

Le dernier expert était d'accord avec la règle et ses réponses rejoignent les résultats de la logique floue.

3.4.2 Groupe de règles G2 : Verbose

Pour le groupe **G2** traitant de la verbosité, la valeur-p est de 0,92, impliquant une population homogène et des avis d'experts convergents. En termes de comptage de nombre de réponses d'experts assimilables à une logique, nous avons 10 réponses d'experts correspondant aux résultats binaires, et 17 correspondant aux résultats en logique floue, sur un total de 32 résultats (8 experts x 4 situations d'entrée). Nous avons ensuite 5 réponses doubles d'experts que l'on peut rapprocher de la logique floue, et 5 réponses doubles qui ne peuvent être rapprochés à aucune logique. Au total, cela donne 10 réponses d'experts sur 32 correspondants à la logique binaire et 22 sur 32 à la logique floue, indiquant une proximité significativement plus importante avec les résultats de la logique floue.

Par ailleurs, sept des huit experts ont proposé des résultats évoluant graduellement au fur et à mesure de la dégradation des caractéristiques d'entrée, la réception au langage et le niveau d'attention, et passant par les différentes variables intermédiaires (« summarized » et « concise »). Les experts prenaient donc en compte les deux variables d'entrée afin de calculer un résultat pondéré.

Le dernier expert a conseillé de ne s'appuyer que sur la variable ayant la meilleure valeur pour effectuer l'adaptation, afin de "s'appuyer sur une force", ce qui serait une approche plus proche de la logique binaire.

Au total, les experts sont, pour le groupe **G2**, nettement en faveur de la logique floue, qui permet une prise en compte simplifiée des différentes valeurs d'entrée pour fournir un résultat graduel et proportionné.

3.4.3 Groupe de règles G3 : Niveau de guidage

Pour le groupe **G3**, la valeur-p est de 0,99, impliquant que les avis des experts convergent. Les résultats du comptage de nombre de réponses proches d'une logique étaient de 18 réponses proches de la logique binaire, contre 16 réponses proches de la logique floue, et 4 réponses doubles non assimilables à une logique en particulier, et il ne semble donc pas y avoir de différence significative entre les deux logiques.

Sept des huit experts ont proposé un niveau de guidage "medium" pour la première situation d'entrée (par exemple un utilisateur ayant les deux caractéristiques d'entrée, connaissance de l'informatique et connaissance de ce site web, à un niveau relativement bon), et un niveau de

guidage "high" pour la dernière situation (par exemple un utilisateur ayant les deux caractéristiques d'entrée à un niveau relativement bas). Pour la situation d'entrée intermédiaire (par exemple, un utilisateur avec une bonne valeur et une mauvaise pour les deux caractéristiques d'entrée), les résultats ont varié entre les deux réponses possibles, "medium" et "high".

Le huitième expert a déclaré qu'il « favoriserait le guidage en fonction des besoins » ce qui pour lui impliquait de fournir un niveau élevé de guidage dans toutes les situations. Il semblait donc plutôt favorable à la suppression de l'adaptation concernant le guidage, ce qui semble paradoxal par rapport à sa préconisation d'un guidage adapté aux besoins.

Ces résultats ne permettent de mettre en avant ni la logique booléenne ni la logique floue, ce groupe de règles n'ayant que deux entrées et une sortie à deux états, les différences entre logiques restent insignifiantes.

3.4.4 Groupe de règles G4 : Correction des clics

Pour le groupe **G4** traitant du clickCorrection, la valeur-p est de 0,98, traduisant une population homogène et des avis d'experts convergeant. Le décompte des réponses proches d'une des logiques indique 14 résultats d'experts correspondant aux résultats binaires, et 30 correspondant aux résultats flous, sur un total de 56 résultats (8 experts x 7 situations d'entrée). Nous avons ensuite 1 réponse double d'expert que l'on peut rapprocher de la logique floue, et 5 réponses doubles qui ne peuvent être rapprochés d'aucune logique. Au total, cela donne 14 résultats d'experts sur 56 correspondants à la logique binaire (soit 25%), et 31 sur 56 à la logique floue (soit 55%), les experts sont donc significativement en faveur de la logique floue.

Toutefois, quatre des experts ont déclaré au cours de l'entretien que, pour ce groupe de règles, ils utiliseraient la valeur maximale entre les deux entrées, acuité visuelle et précision des mains, pour calculer la valeur de sortie, et non une valeur intermédiaire calculée à partir des deux entrées. En d'autres termes, il en résulterait un poids maximum pour l'une des entrées (celle qui présente le meilleur niveau) et un poids nul pour la deuxième caractéristique. Cela rejoint plutôt le fonctionnement de la logique booléenne, bien que cela reste possible à réaliser en logique floue.

Les quatre experts restants étaient favorables à l'utilisation d'une valeur moyenne entre les deux entrées, et leurs résultats étaient donc plus proportionnels aux entrées, et donc plus proches de la logique floue.

3.4.5 Groupe de règles G5 : Taille de police

Comme nous l'avons vu plus haut, pour le groupe de règles **G5**, impactant la taille de police, la valeur-p avec les huit experts est de 0,13, traduisant une population hétérogène et donc des avis d'experts divergents. Cependant, cette valeur-p monte à 0.97 après élimination des réponses de l'expert n°3. Nous avons basé notre analyse sur les avis des sept experts convergents, en traitant les réponses de l'expert n°3 comme une anomalie dans la population étudiée.

Pour ce groupe de règles, nous avons ensuite effectué un calcul de distance entre les réponses des experts et le résultat théorique binaire d'un côté, et entre experts et résultat théorique flou d'un autre, cette distance étant la différence entre la réponse d'un expert et la taille préconisée par le moteur d'adaptation considéré, pour chaque situation d'entrée. La moyenne de ces distances est de -0,03 pour la logique binaire, contre -0,63 pour la logique floue, et l'écart-type de

ces distances est de 0,83 pour la logique binaire et 0,91 pour la logique floue, ne traduisant donc rien de significatif en faveur de l'une ou l'autre des logiques.

L'une des raisons pouvant expliquer cette faible différence est qu'il est généralement plus naturel de raisonner en termes de chiffre entier, et donc de seuils ; de plus, ce groupe de règles arrivait en dernier, ce qui pouvait favoriser ce type de raisonnement, après avoir eu affaire avec les quatre premiers groupes de règles, où les réponses possibles étaient sous forme de liste, et donc de valeurs discrètes avec des seuils.

Deux experts ont d'ailleurs préconisé l'utilisation de seuils, comme dans la logique booléenne classique.

Cependant, durant la discussion avec les experts, après qu'ils aient donné leurs réponses et suite à une question de l'enquêteur, les six autres experts ont recommandé des calculs précis et linéaires de la taille des caractères à partir de l'acuité visuelle de l'utilisateur afin d'éviter les effets de seuil, qu'ils considéraient être un inconvénient potentiel pour les utilisateurs, et qui est conforme à la logique floue.

Au total, pour ce groupe, nous considérons donc que les préconisations des experts sont en faveur de la logique floue.

3.5 Discussion ouverte avec les experts

Deux experts ont déclaré que la façon de traiter l'incertitude en logique floue était particulièrement adaptée aux valeurs déclarées par les utilisateurs, permettant une prise en compte simplifiée des différentes variables d'entrées.

Trois experts ont également indiqué que la gestion de la combinaison de règles de la logique floue était une bonne chose, bien qu'il puisse parfois être nécessaire de maintenir un système de pondération pour certaines règles. Par exemple, dans le calcul du niveau de guidage, ils préconisaient d'accorder une importance plus grande à la valeur de `websiteExperience` (connaissance du site visité) qu'à celle de `itExperience` (connaissance de l'informatique en général) – voir le groupe de règles **G3**.

3.6 Synthèse

Le Tableau 6 résume notre interprétation des résultats présentés ci-dessus, en se basant sur les résultats du comptage et des distances, et confrontés aux explications et compléments apportés par les experts dans la phase d'entretien. Nous avons ainsi pu moduler les résultats objectifs des calculs par une interprétation plus nuancée, qui a permis de représenter l'adhésion des experts aux résultats des deux logiques avec une échelle de Likert à trois degrés.

Concernant les résultats du groupe **G1** (`displayMode`), six des huit experts étaient en désaccord avec la règle elle-même et n'auraient pas mis en place une adaptation, entraînant de fait une difficulté à analyser les résultats dans le cadre de la comparaison de logique. Nous avons traduit ce désaccord avec la règle elle-même par un accord « faible » des experts avec chaque logique au sein du tableau.

Les résultats du groupe **G2** (verbose) sont quant à eux significatifs et permettent de mettre en avant la logique floue, avec un comptage de réponses assimilables à une logique particulièrement favorable à la logique floue.

Tableau 6 : Synthèse des avis d'experts

N°	Variables d'entrée	Variable de sortie	Accord des experts avec	
			Logique floue	Logique booléenne
G1	websiteExperience abstractSignsUnderst. languageReception	displayMode	○	○
G2	languageReception attention	verbose	●	○
G3	itExperience websiteExperience	guidanceLevel	○	○
G4	visualAcuity handPrecision	clickCorrection	◐	◐
G5	visualAcuity	fontSize	●	○

Accord des experts : ● : Fort, ◐ : Moyen, ○ : Faible

Les résultats du groupe **G3** (guidanceLevel) ne sont pas significatifs et ne permettent pas de mettre en avant une logique par rapport à l'autre en raison du faible nombre de situations d'entrée, associé au fait que cette règle ne se base que sur deux entrées, et n'impacte qu'une variable de sortie ayant deux valeurs possibles. Cela a été traduit par un accord « faible » des experts avec chaque logique.

Les résultats du groupe **G4** (clickCorrection) sont eux aussi significatifs, toutefois, quatre des experts ont recommandé de n'utiliser que la valeur maximale (et donc celle correspondant au plus haut niveau de handicap) entre les deux entrées pour effectuer cette adaptation, alors que les résultats des quatre autres experts tendent vers la logique floue. Cela nous a amené à décrire les résultats dans le Tableau 6 comme étant un accord moyen des experts avec chaque logique.

Concernant le groupe **G5** (fontSize), la moyenne et l'écart-type des distances calculés pour chaque logique entre les réponses des différents experts avec les résultats théoriques ne permet pas de mettre en avant une logique particulière. Toutefois, après discussion avec les experts, six d'entre eux étaient particulièrement favorables à la logique floue, permettant un résultat proportionnel à l'entrée, sans effet de seuil.

4 Discussions

D'après les résultats que nous avons obtenus lors de notre évaluation, la logique floue semble répondre aux besoins d'un moteur d'adaptation d'IHM. Toutefois, nos modalités d'expérimentation et la mise en œuvre des règles peuvent être discutées plus en détails pour en cerner les limites.

4.1 Portée de l'étude et de l'expertise

Les entretiens ont été réalisés auprès de huit experts selon les préconisations de Nielsen & Mack [Nielsen et al. 1994] pour la détection des problèmes d'utilisabilité. Il pourrait toutefois être intéressant d'élargir le panel à des experts internationaux, car cela permettrait d'obtenir un éventail plus large de contextes. Par exemple, aucun des experts n'était ergonomiste ou expert en logique floue. Il serait utile d'interroger des experts spécialisés en ergonomie ou ayant une formation en IHM et en logique floue afin d'obtenir davantage de réactions lors de la discussion ouverte finale. Toutefois, une évaluation d'experts ne peut pas remplacer entièrement le retour d'information des utilisateurs finaux.

Une autre question de validité est liée à l'exemple choisi. Comme mentionné dans la section IV.2.1, les données d'entrée utilisées pour l'analyse de comparaison ont été sélectionnées manuellement par les auteurs afin de mettre en évidence les différences entre les deux logiques, mais les résultats ont été calculés uniquement par leur moteur respectif. D'autres données pourraient être prises en compte dans une expérience similaire. De plus, les règles ont été illustrées au travers de l'exemple d'un site web de réservation d'hôtel. Le domaine d'autres sites web pourrait être utilisé pour renforcer les résultats.

4.2 Pertinence des règles

Selon notre étude, la logique floue semble adéquate pour soutenir un moteur d'adaptation des IHM. Néanmoins, il y a toujours la question de la pertinence et de la couverture des règles exprimées. Celles-ci peuvent être considérées comme limitées ou choisies arbitrairement. Pour pallier ces lacunes, nous avons utilisé des règles provenant principalement de la littérature d'adaptation des IHM [Peissner et al. 2012, Moss 2009, Rello et al. 2013, Stephanidis et al. 2006, Leuteritz et al. 2009, Denic et al. 2005]. Dans cette étude, il y avait trois règles en logique booléenne (six en logique floue) relatives aux dispositifs (taille et orientation de la fenêtre), une règle (quatre en logique floue) relative à l'environnement (luminosité), et trente règles (soixante-et-onze en logique floue) relatives à l'utilisateur. En ce qui concerne l'utilisateur, vingt-trois des trente règles proviennent de la littérature [Peissner et al. 2012, Moss 2009, Rello et al. 2013, Stephanidis et al. 2006, Leuteritz et al. 2009, Denic et al. 2005], dont onze règles tirées du projet européen MyUI, à partir de publications [Peissner et al. 2012], et de pages web traitant du projet MyUI : la page web officielle du projet [MyUI Project Official Web Page], ainsi que la liste des patrons de conceptions [MyUI Pattern Browser].

Nous avons été confrontés à un problème de validation des règles par les experts : certains n'étaient pas d'accord avec les règles elles-mêmes (notamment le groupe de règles **G1**, pour la sortie DisplayMode). Le problème était donc davantage lié à un manque de consensus sur les règles au sein de la communauté IHM qu'à la règle elle-même.

5 Synthèse du chapitre

Ce chapitre a montré l'intérêt potentiel de l'utilisation de la logique floue en termes d'incertitude des valeurs d'entrée et de combinaison des règles d'adaptation. Les solutions de la logique floue et de la logique booléenne ont été comparées, d'abord théoriquement, puis par le biais d'entretiens réalisés auprès de huit experts. La comparaison théorique a montré les

IV. Comparaison entre logique booléenne et logique floue pour l'adaptation des IHM

avantages de la logique floue, grâce à sa gestion de l'incertitude des valeurs et de sa combinaison des règles. La logique floue permet une prise en compte de plusieurs entrées, intrinsèquement pondérées en fonction de leurs degrés d'incertitude, et fournit des résultats progressifs, évitant les effets de seuils. Les entretiens avec les experts viennent conforter cette comparaison théorique. Ce chapitre s'est terminé par une discussion large sur l'expérimentation menée.

Conclusion

Dans ce chapitre de conclusion, nous rappelons les différentes contributions apportées par ce travail de recherche, nous discutons des limitations identifiées, et nous proposons différentes perspectives de recherche.

1 Contributions

Dans cette thèse, nous avons abordé la problématique de l'accessibilité des interfaces web en par le biais d'une approche d'adaptation des interfaces. Les verrous qui ont été abordés sont l'incertitude des valeurs du contexte d'usage, la complexité et la combinatoire de multiples règles d'adaptation, dans le cadre d'un contexte d'usage conséquent. En réponse à cette problématique et ces verrous, nous avons proposé une architecture et son implémentation qui permettent d'améliorer l'accessibilité des IHM grâce à un moteur d'adaptation utilisant la logique floue. Notre contribution, Fuzzy4U, permet ainsi de prendre en compte :

- Un **contexte d'usage étendu**, c'est-à-dire comprenant de nombreuses caractéristiques, et provenant des trois aspects du contexte d'usage : à la fois des caractéristiques concernant l'utilisateur, la ou les plateformes utilisées par cet utilisateur, et l'environnement dans lequel ce dernier évolue. Pour cela, nous nous sommes basés sur le contexte d'usage préexistant au sein du prototype initial, que nous avons étendu grâce à une analyse de la littérature.
- L'**incertitude des valeurs** des caractéristiques du contexte d'usage, est prise en compte grâce à l'utilisation de la logique floue, par le biais des fonctions d'appartenance, qui permettent de définir un niveau de certitude variables entre les différents états d'une variable sur le domaine de celle-ci.
- La **complexité des règles** : l'expression des règles floues est simple, les règles ayant des prémisses basées sur une seule variable et ne mélangeant donc pas les conditions. Les règles floues ont aussi l'avantage d'être plus proches du langage naturel [Hersh et al. 1976]. De plus, certains cas particuliers peuvent être implémentés en logique floue grâce à des règles particulièrement plus simples qu'en logique booléenne. C'est notamment le cas lorsqu'une entrée et une sortie sont définis sur des domaines continus ou des domaines discrets mais ordonnés, et que la sortie doit être proportionnelle à l'entrée. Par exemple, une adaptation de la taille de police de caractères en fonction de l'acuité visuelle de l'utilisateur : dans le cas de la logique booléenne, ceci nécessite de définir un certain nombre de seuils (et donc une règle pour chaque seuil) correspondant aux différents échelonnages de la sortie et déterminant ainsi la granularité finale du résultat ; alors que la logique floue permet d'implémenter cela en ayant uniquement à définir deux seuils, le seuil minimum et le seuil maximum, sans seuil intermédiaire, tout en récupérant un résultat proportionnel à l'entrée, traduisant une granularité extrêmement plus fine et évitant les effets de seuils. Ceci permet de faciliter la gestion d'un grand nombre de règles, tout en utilisant les nombreuses caractéristiques du contexte d'usage.

- Une gestion simple de la **combinatoire entre règles** : grâce à une gestion intrinsèque de la combinatoire et par le biais d'une méthode de défuzzification particulière (le calcul d'un barycentre pondéré entre les différentes sorties calculées), la logique floue permet de proportionner une variable de sortie en fonction du degré d'incertitude de la ou des entrées. Lorsque plusieurs variables d'entrées influent sur une même variable de sortie, ce fonctionnement permet de remplacer la mise en place d'un système de pondération explicite entre différentes règles, nécessaire en logique booléenne. Ceci, associé à des règles simples, permet de limiter les risques de problèmes lors d'un passage à l'échelle du système, et facilite la maintenance et l'évolution des règles.

Nous avons aussi précisé que certaines recommandations d'accessibilité, trop générales ou trop vagues, sont difficiles à transcrire en règles d'adaptation (par exemple la règle 1.1.1 du WCAG : « si le contenu non textuel vise d'abord à créer une expérience sensorielle spécifique, l'équivalent textuel fournit au moins une identification descriptive de ce contenu non textuel »), mais que lorsqu'elles sont assez précises, cette transcription est faisable (par exemple la première recommandation du WAI-AGE est l'utilisation de police de caractères d'une taille minimale de 12-14pt pour les personnes âgées). Au travers d'un exemple fil rouge détaillant la situation d'un utilisateur théorique (Bernard, une personne âgée ayant divers handicaps liés à son âge et souhaitant se rendre dans un hôtel pour ces vacances), nous avons présenté 26 exemples de règles tirées de cette transcription, et comment ces règles peuvent ensuite être activées dynamiquement en fonction de la situation de l'utilisateur pour améliorer l'accessibilité des IHM. Grâce à la gestion intrinsèque de l'incertitude et de la combinatoire des règles de la logique floue, cette dernière permet le renforcement ou la modération mutuelle de règles afin de parvenir à un résultat moyenné. Nous avons montré sur un prototype comment elles pouvaient être mises en œuvre, et illustré cela grâce à notre exemple fil rouge

Enfin, nous avons réalisé deux comparaisons entre logique floue et logique binaire. Dans un premier temps, nous avons réalisé une comparaison théorique entre les résultats renvoyés par la logique booléenne et ceux renvoyés par la logique floue pour différentes situations d'entrées. Puis, dans un second temps, nous avons décrit ces mêmes situations d'entrées à des experts en IHM dans le but de récolter leurs préconisations en termes d'adaptation d'IHM et leurs remarques, puis de comparer leurs préconisations aux résultats théoriques des deux logiques afin de déterminer de quelle logique ces résultats se rapprochent le plus. La comparaison théorique nous a permis de conforter notre hypothèse que la logique floue avait les capacités de répondre à nos verrous, proposant des résultats qui nous semblaient plus appropriés aux situations d'entrées choisies. La seconde comparaison nous a permis de tester cette hypothèse par le biais d'entretiens avec des experts en IHM et qui nous a permis d'obtenir des résultats positifs.

Selon les résultats obtenus lors de ces évaluations, la logique floue semble répondre aux besoins d'un moteur d'adaptation d'IHM, tout en répondant à nos critères, à savoir la prise en compte de l'incertitude des valeurs, de la complexité des règles et de leurs combinaisons, sans restreindre le contexte d'utilisation.

2 Discussion

Nous avons montré comment nos contributions répondaient aux différents verrous identifiés dans notre question de recherche. Toutefois, nos modalités d'expérimentation et la mise en œuvre des règles en logique floue peuvent être discutées plus en détails pour en cerner les limites.

2.1 Fonctions d'appartenance et méthodes de fuzzification et de défuzzification

Comme présenté dans la section III.1.3, la logique floue nécessite la définition de fonctions d'appartenance pour chacun des états d'une variable linguistique, ainsi que des phases de fuzzification et de défuzzification. Ces phases sont essentielles pour obtenir des résultats pertinents.

Premièrement, les fonctions d'appartenance peuvent être créées de différentes manières et la question de l'approche la plus pertinente se pose donc. Les différentes possibilités sont : fonctions continues par morceaux, lignes brisées rectangulaires ou triangulaires, lignes gaussiennes... Certains types de courbes ne se prêtaient pas à nos travaux. Par exemple, les fonctions continues par morceaux donneraient lieu à des effets de seuil aux discontinuités et ne seraient donc pas les plus adaptées pour représenter les caractéristiques des utilisateurs ; elles pourraient servir à représenter des variables nécessitant spécifiquement l'utilisation d'un seuil (par exemple, avoir deux adaptations différentes d'un côté ou de l'autre d'un point de la courbe), mais nous n'avons pas trouvé de cas où cela aurait pu être intéressant pour l'adaptation des IHM. De même, les lignes brisées de forme rectangulaire signifieraient qu'il n'y a pas de gestion de l'incertitude et retomberaient donc dans une opération similaire à la logique booléenne : en effet, l'angle d'inclinaison des courbes est ce qui permet à la logique floue de définir les différents degrés d'incertitude, alors qu'une ligne brisée rectangulaire implique d'avoir des courbes passant directement de totalement faux (0) à totalement vrai (1) ou inversement, impliquant de fait que l'incertitude des courbes ne sera que 0 ou 1, sans aucune valeur intermédiaire. Dans notre travail, nous avons utilisé des lignes brisées triangulaires, recommandées pour l'utilisation de la logique floue parce qu'elles permettent des calculs plus simples, qu'elles sont plus faciles à appréhender par les experts et qu'elles permettent d'avoir des résultats fiables [Pedrycz 1994, Barua et al. 2014].

Le deuxième point est la phase de fuzzification. Pour rappel, la fuzzification consiste à associer une valeur floue à une valeur d'entrée, en fonction de la fonction d'appartenance du terme de la variable linguistique impliqué dans la proposition floue. Par exemple, les différentes fonctions d'appartenance pour chaque terme de la précision de la main de l'utilisateur (normal, low, veryLow et extraLow). La difficulté est que la définition de ces fonctions d'appartenance reste subjective, car la littérature ne fournit pas toujours pas les seuils à utiliser pour la définition desdites fonctions, et plus particulièrement l'incertitude autour de ces seuils. Il sera donc nécessaire de valider expérimentalement les variables et les règles choisies. Dans ce travail, nous nous sommes initialement basé sur la définition classique des variables utilisées au sein de MyUI [Peissner et al. 2012] pour la majorité de nos propres variables. La majorité des variables utilisées par MyUI sont définies sur le domaine [0;4] et utilisent quatre états, un pour chacun des sous-domaines [0;1], [1;2], [2;3] et [3;4]. Toutefois, certaines variables ont été définies d'une autre manière, soit parce que cette représentation ne convenait pas (ce qui est notamment le cas pour

les variables nominales, comme les différents types de daltonisme), ou parce que nous avons proposé une autre implémentation ayant des avantages dans certains cas particulier (tel que le calcul proportionnel d'une taille de police en fonction de l'acuité visuelle d'un utilisateur).

Enfin, la défuzzification, qui consiste à transformer la valeur floue calculée en valeur « crisp » (c'est-à-dire non-floue, afin de pouvoir être utilisable par le reste du système) peut être implémentée de différentes manières : utilisation du premier ou dernier maximum, du maxima moyen ou du centre de gravité pondéré. Le choix de la méthode de défuzzification est défini pour chaque variable linguistique de sortie, et il peut dépendre à la fois du type de cette dernière (valeurs continues ou discrètes) et de la logique souhaitée de la règle. Dans notre travail, les règles ont toutes été définies avec un centre de gravité pondéré, afin de calculer une moyenne des résultats pour les règles qui affectent la même variable de sortie, au lieu d'utiliser un seul des résultats (ce qui est le cas avec la méthode de défuzzification des maxima ou minima). Cependant, le calcul des centres de gravité pondérés n'est pas parfait : par exemple, il a fallu définir le domaine de valeur de la taille de la police (`fontSize`, voir Figure 37) entre 6 et 24 pour obtenir des résultats pertinents entre 12 et 18 en raison de nos choix de représentation des variables, ainsi que du mode de fonctionnement de la logique floue et des fonctions d'appartenance : dans notre moteur, le résultat d'une défuzzification ne peut pas valoir un extrême ou l'autre du domaine d'un graphique étant donné que nous calculons le centre de gravité d'une aire, à partir de variables linguistiques dont les courbes ne peuvent pas entraîner une aire nulle (voir section IV.1.2). Cela nous a toujours permis d'obtenir des résultats conformes aux préconisations des experts. On peut toutefois se demander si une méthode de défuzzification différente serait plus pertinente et permettrait de dépasser ces problèmes.

2.2 Types de variables utilisées

Dans ce travail, nous avons utilisé des variables quantitatives (par exemple, l'acuité visuelle, pouvant être mesurée durant un examen ophtalmologique et donnant une note sur 10 pour chaque œil), des variables ordinales (par exemple, l'augmentation de la zone de clic des interacteurs, nommé `clickCorrection` dans ce manuscrit et établissant différents degrés d'aide au clic) et des variables nominales (par exemple, les types de daltonisme : protanopie, deutéranopie, tritanopie ou achromatie). Par rapport à la logique booléenne, les contributions de la logique floue ont porté sur des variables quantitatives ou ordinales. Les variables nominales sont utilisées de la même manière dans les deux logiques, sans contribution particulière de la logique floue par rapport à la logique booléenne. En effet, les variables nominales, dont les valeurs ne peuvent pas être ordonnées, ne permettent pas de gérer leurs incertitudes au travers de la logique floue ; ce qui revient à un fonctionnement similaire à la logique booléenne.

Avec le recul, nous nous questionnons sur la pertinence de certaines variables nominales, telle que la variable de daltonisme, qui regroupe ici cinq termes, un terme pour représenter un utilisateur non daltonien, et quatre termes pour les quatre différents types de daltonisme (deutéranopie, tritanopie, protanopie et achromatopsie). On pourrait discuter de la conversion de cette variable nominale en quatre variables quantitatives distinctes. Ceci permettrait de représenter chacun des quatre types de daltonisme de manière indépendante, et possédant chacun un certain degré de certitude. Cela donnerait la possibilité d'adapter les couleurs de l'interface de manière plus nuancée, mais nécessiterait que l'utilisateur soit capable d'estimer son

niveau de daltonisme, ou que le système soit capable d'inférer cela, par exemple par le biais d'un test de perception des couleurs, tel que le test HRR de Richmond [Cole et al. 2006].

2.3 Transcription de règles d'accessibilité

Un certain nombre de recommandations sur l'accessibilité que nous avons trouvées dans la littérature ne sont pas transcriposables en règles d'adaptation. En effet, pour pouvoir transcrire une règle, il est nécessaire d'avoir une métrique afin de caractériser les éléments de contexte pertinents, ainsi que des préconisations à appliquer sur l'IHM, correspondant aux différentes situations identifiées par la métrique. Par exemple, la recommandation du WAI-AGE préconisant l'utilisation de police de caractères d'une taille minimale de 12-14pt pour les personnes âgées : nous avons ici une métrique (l'âge), une situation (« personne âgée »), et une préconisation (taille de police minimale à appliquer). Il reste cependant difficile de transcrire la totalité des règles. Par exemple, la règle 1.1.1 du WCAG spécifie que « si le contenu non textuel vise d'abord à créer une expérience sensorielle spécifique, l'équivalent textuel fournit au moins une identification descriptive de ce contenu non textuel ». Mais il semble peu réalisable d'identifier a posteriori sur une page Web quelconque si, par exemple, une image est présentée pour susciter une émotion (adhésion, rejet), une expérience spécifique (immersion, admiration) ou pour alléger un texte qui pourrait sembler trop dense. Ainsi, à moins d'annoter le contenu des IHM avec des indicateurs spécifiques, l'intention du concepteur reste inconnue et il est donc impossible d'exprimer que l'identification descriptive doit être proposée par défaut si l'utilisateur n'est pas à même de partager cette expérience sensorielle.

Par ailleurs, la littérature ne donne que peu de règles à respecter en cas de contexte d'usage complexe et dynamique, par exemple pour une personne ayant une combinaison de plusieurs handicaps (permanents ou situationnels), comme c'est le cas pour Bernard (voir chapitre II), qui est pourtant un exemple simplifié, ne prenant en compte qu'un nombre restreint de caractéristiques. Cette question difficile a été abordée dans quelques travaux comme la thèse d'Amélie Roche en 2015 [Roche 2015], mais, d'après ce que nous en avons vu, plutôt sous l'angle des techniques de conception d'IHM pour les polyhandicapés (et notamment le recueil de besoins) que sous l'angle de la définition de systèmes adaptatifs.

Dans un système adaptatif, l'une des difficultés est que deux handicaps non exclusifs peuvent avoir des recommandations qui se renforcent ou s'opposent. On pourrait par exemple souhaiter augmenter la taille de police (par exemple si un utilisateur a une mauvaise acuité visuelle) mais aussi la réduire (car cet utilisateur est aussi atteint de vision tunnelisée). Une adaptation ne prenant en compte que l'un des handicaps pourrait poser problème, car l'utilisateur pourrait se retrouver pénalisé en rapport à son second handicap qui nécessitait une adaptation opposée. Notre outil permet ici de calculer un compromis entre les deux recommandations, via la logique floue et sa gestion de l'incertitude et de la combinatoire des règles. Néanmoins, on peut se demander si un tel compromis est toujours la bonne approche. Ainsi, selon l'exemple ci-dessus, il serait possible d'arriver à ne faire aucune adaptation, si le compromis consiste à calculer la moyenne entre deux extrêmes. Il pourrait donc parfois être pertinent de privilégier une règle sur une autre même si elles influencent la même variable de sortie. On pourrait ainsi considérer que sur un contenu réduit (comme un bouton unique pour valider une opération), il serait pertinent de ne prendre en compte que la mauvaise acuité visuelle ; tandis que sur un texte long, il pourrait

être pertinent d'utiliser une nouvelle règle, par exemple en augmentant les marges gauches et droites pour faciliter la lecture dans la vision tunnelisée tout en augmentant la taille de police. Le juste compromis serait cependant complexe à trouver car il dépendrait alors des caractéristiques incertaines de l'utilisateur et du contenu présenté.

3 Perspectives

Plusieurs aspects subséquents à notre travail restent à explorer.

Tout d'abord, une série de travaux pourrait être menée afin d'améliorer la validation de notre approche. Dans ce cadre, un premier travail consiste à valider auprès d'utilisateurs l'intérêt d'IHM adaptatives basées sur la logique floue. Pour cela, nous avons conçu une expérimentation avec des utilisateurs finaux et nous sommes actuellement en phase de collecte de données. Cette expérimentation consiste en un site web de réservation de chambre d'hôtel, au sein duquel les utilisateurs ont à réaliser trois tâches ayant différents niveaux de complexité ; et ayant pour but de déterminer (1) si l'adaptation de l'IHM a bien un impact sur la perception des utilisateurs, et (2) quelles sont les adaptations qui ont le plus d'impact. Nous souhaitons ainsi étudier le niveau d'accessibilité et la charge de travail perçue par les utilisateurs, de même que les émotions suscitées. De plus, en lien avec le domaine du Marketing, nous avons prévu d'analyser la satisfaction des utilisateurs et leur intention de réutiliser le système en fonction des adaptations mise en place.

Dans un deuxième temps, nous souhaiterions effectuer une expérimentation avec des utilisateurs finaux qui opposerait cette fois une adaptation réalisée par le biais de la logique floue à une adaptation en logique booléenne. Ceci permettrait de vérifier si un système d'adaptation des IHM en logique floue obtient effectivement de meilleurs résultats auprès des utilisateurs qu'un système d'adaptation basé sur la logique booléenne. Une telle expérimentation serait facile à mettre en place étant donné que nous pouvons pour cela réutiliser notre implémentation d'un site web d'hôtellerie, ainsi que les tâches de l'expérimentation précédente. De plus, Fuzzy4U permet déjà d'utiliser au choix la logique booléenne ou la logique floue pour son calcul des adaptations.

En ayant à disposition une base de règles bien plus conséquente, il serait important de valider que le moteur en logique floue offre toujours des performances acceptables. Nous avons décrit un prototype utilisant 87 règles, et il faudrait vérifier que plusieurs centaines de règles ne posent pas de problème de charge, avec un temps de calcul trop important, ou encore que l'utilisation de la méthode de défuzzification du barycentre pondéré reste bien pertinente, au travers du calcul d'un résultat moyenné.

Un deuxième axe de perspective consiste à améliorer le prototype proposé au-delà du moteur d'adaptation. Au sein de notre prototype, le moteur d'adaptation a été modifié afin de pouvoir utiliser la logique floue. Il serait intéressant de modifier le moteur d'inférence pour lui permettre à lui aussi d'utiliser la logique floue. Cela pourrait permettre d'avoir une représentation du contexte d'usage plus précise.

Il sera aussi intéressant de réaliser une comparaison entre notre système d'adaptation en logique floue et d'autres approches, telle qu'une approche en apprentissage automatique, avec

par exemple le travail de Genaro Motti [Genaro Motti et al. 2012] qui a obtenu de bonnes évaluations au regard de nos différents verrous dans notre analyse de l'état de l'art. L'apprentissage automatique a en effet des avantages au niveau de nos différents verrous, et une comparaison avec notre système permettrait de mieux cerner les apports et les limites des différentes approches.

Une autre perspective intéressante serait de déterminer quel serait le moment le plus propice pour effectuer l'adaptation d'une interface suite à un changement de contexte. Dans le système que nous proposons, l'adaptation est réalisée dès qu'un changement de contexte est détecté. Adapter et donc modifier une interface en train d'être consultée de façon trop rapprochée risque d'entraîner une certaine gêne pour l'utilisateur. C'est pourquoi il nous semble nécessaire de questionner s'il serait préférable de retarder l'adaptation afin de réduire cette gêne pour l'utilisateur. Il serait par exemple possible de n'adapter l'interface que toutes les 5, 30 ou 60 secondes ou encore uniquement au changement de page. Toutefois, cette question devra être étudiée pour chaque règle, certaines situations bénéficiant d'une adaptation rapide, telle qu'une adaptation rapide du contraste et de la luminosité de l'interface suite à un changement de luminosité ambiante soudain. Nous proposons d'aborder cette problématique en permettant à un concepteur implémentant notre architecture de définir à quel moment les différentes adaptations doivent être réalisées. De plus, il sera donné la possibilité aux utilisateurs de modifier ce paramétrage au travers de la méta-IHM, afin de correspondre à leurs préférences.

A plus long terme, se pose la question de l'accessibilité pour tout type de handicap. Il serait intéressant d'étendre la base de règles d'adaptation afin de prendre en compte un plus grand nombre de handicaps et de situations. Par exemple, déterminer quelles seraient les adaptations à proposer à un utilisateur souffrant de la maladie d'Alzheimer, ou encore étendre la base de règles à d'autres modalités d'interaction, afin, par exemple, de pouvoir proposer des adaptations pour des utilisateurs très malvoyants au travers d'une synthèse vocale. De plus, au vu des difficultés à identifier les recommandations d'accessibilité, dispersées dans la littérature, et à les formaliser en règles codées dans le cas de contextes d'usage complexes, il serait utile de créer un référentiel de règles basées sur les recommandations.

Au-delà des règles, la prise en compte de différentes situations de handicaps peut nécessiter de concevoir des dispositifs d'interaction particuliers. Il serait intéressant que l'adaptation puisse se réaliser en connaissant les dispositifs disponibles ainsi que leurs caractéristiques. Il se pose alors d'autres problèmes, tels que le choix du dispositif sur lequel afficher l'interface ou encore la combinaison de dispositifs d'interaction à utiliser en entrée comme en sortie.

Références

- Abrahão S., Bordeleau F., Cheng B., Kokaly S., Paige R. F., Störrle H. et Whittle J., 2017. User Experience for Model-Driven Engineering: Challenges and Future Directions. In 2017 ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS).
- Akiki P., 2014. Engineering Adaptive Model-Driven User Interfaces for Enterprise Applications. PhD thesis. The Open University.
- Akiki P., Bandara A. K., Yu Y., 2014. Adaptive Model-Driven User Interface Development Systems. *ACM Computer Survey*, 47 (1), Article 9 (Mai 2014), 33 pages.
- Alm N., Dye R., Gowans G., Campbell J., Astell A. J., Ellis M., 2007. A Communication Support System for Older People with Dementia. IEEE Computer society, Washington.
- Appriou A., Cichocki A., Lotte F. 2018. Towards Robust Neuroadaptive HCI: Exploring Modern Machine Learning Methods to Estimate Mental Workload From EEG Signals. *ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems - Extended Abstracts (Late Breaking Work)*, Apr 2018, Montreal, Canada.
- Aquino N., Vanderdonck J., Valverde F. et Pastor O., 2009. Using Profiles to Support Model Transformations in the Model-Driven Development of User Interfaces. In: Lopez Jaquero V., Montero Simarro F., Molina Masso J., Vanderdonck J. (eds) *Computer-Aided Design of User Interfaces VI*, pp. 35-46. Springer, London.
- Bamidis P.D., Vivas A.B., Styliadis C., Frantzidis C., Klados M., Schlee W., Siountas A., Papageorgiou S.G., 2014. A review of physical and cognitive interventions in aging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 44, pp. 206-220.
- Barua A., Mudunuri L. S., Kosheleva O., 2014. Why Trapezoidal and Triangular Membership Functions Work So Well: Towards a Theoretical Explanation. *Journal of Uncertain Systems*, vol. 8, pp. 164-168.
- Beka Be Nguema M., Kolski C., Malvache N., Waroux D., 2000. Design of Human Error Tolerant Interface Using Fuzzy Logic. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13 (3), pp. 279-292.
- Berner J., 2014. Psychosocial, Socio-Demographic and Health Determinants in Information Communication Technology Use by Older-Adults. Thèse de doctorat, Blekinge Institute of Technology, Suède.
- Besharat M., Haidar F., 2003. Ambient light controlled display and method of operation, brevet US US20050037815A1, Motorola Inc.
- Blouin A., Morin B., Beaudoux O., Nain G., Albers P. et Jézéquel J.-M., 2011. Combining Aspect-oriented Modeling with Property-based Reasoning to Improve User Interface Adaptation. In *Proceedings of the 3rd ACM SIGCHI symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, Pise, Italy, pp. 85-94.

- Blumendorf M., Feuerstacks S., Albayrak S., 2008. Multimodal User Interfaces for Smart Environments: The Multi-Access Service Platform. In Proceedings of the working conference on Advanced Visual Interfaces, Napoli, 2008, pp. 478-479.
- Bockstaller C., Beauchet S., Manneville V., Amiaud B., Botreau R., 2017. A tool to design fuzzy decision trees for sustainability assessment. *Environmental Modelling & Software*, 97, pp. 130–144.
- Bouchon-Meunier B., 2007. *La logique floue*. Presses Universitaires de France - PUF (Ed.), 2007.
- Bragdon A., Nelson E., Li Y., Hinckley K., 2011. Experimental analysis of touch-screen gesture designs in mobile environments. Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '11). New York: ACM Press, pp. 403-412.
- Brooke J., 1996. SUS: a 'quick and dirty' usability scale. In *Usability evaluation in industry*, edited by: Jordan P.W., Thomas B.A., Weerdmeester B. and McClelland I.L., pp. 189-194. London: Taylor and Francis.
- Byun H. E., Cheverst K., 2004. Utilizing Context History To Provide Dynamic Adaptations. *Applied Artificial Intelligence*, 18. pp. 533-548.
- Calvary G., Coutaz J., Thevenin D., Limbourg Q., Bouillon L. et Vanderdonck J., 2003. A Unifying Reference Framework for Multi-Target User Interfaces. *Interacting with Computers*, 15 (3), pp. 289-308.
- Cao J., Xing N., Chan A., Feng Y. et Jin B., 2005. Service adaptation using fuzzy theory in context-aware mobile computing middleware, in Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA'05), Hong Kong, China, pp. 496-501.
- Céret E., Dupuy-Chessa S., Calvary G., Bittar M., 2016. System and method for magnetic adaptation of a user interface, France INPI Brevet TPI2015053, 07 07 2015 et 07 07 2016.
- Chamberlain A., Kalawsky R., 2004. A comparative investigation into two pointing systems for use with wearable computers while mobile. Proceedings of the IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '04). Washington, D.C.: IEEE Computer Society, pp. 110-117.
- Chesta C., Paterno F., Santoro C., 2004. Methods and Tools for Designing and Developing Usable Multi-Platform Interactive Applications, *PsychNology Journal*, vol. 2, pp. 123-139.
- Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF), 2001. Organisation Mondiale pour la Santé (OMS). Accessible en ligne (en anglais) : <https://www.who.int/classifications/icf/en/>
- Cohen G., Cleron M. A., 2012. Method and system for improving screen readability in daylight with runtime color adjustment, brevet US US8520022B1, Google LCL.

- Cole B., Lian K.-Y. Lakkis C., 2006. The new Richmond HRR pseudoisochromatic test for colour vision is better than the Ishihara test. In *Clinical & experimental optometry: journal of the Australian Optometrical Association*, 89, pp. 73-80.
- Coutaz J., 2006. Meta-User Interfaces for Ambient Spaces. In *Proceedings of the 5th international conference on Task models and diagrams for users interface design (TAMODIA'06)*, Hasselt, Belgium, pp. 1-15.
- Coutaz J., 2010. User Interface Plasticity: Model Driven Engineering to the Limit!. ACM, Engineering Interactive Computing Systems (EICS 2010) International Conference, Keynote paper, Berlin, Germany, pp. 1-8.
- Cueva-Fernandez G., Espada J. P., García-Díaz V., Crespo R. G. et Garcia-Fernandez N., 2016. Fuzzy System to Adapt Web Voice Interfaces Dynamically in a Vehicle Sensor Tracking Application Definition, in *Soft Computing*, 20 (8), pp. 3321-3334.
- De Lara S., Watanabe W., Dos Santos E., Fortes R., 2010. Improving WCAG for Elderly Web Accessibility, in *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Design of Communication (SIGDOC'10)*, São Paulo, Brésil.
- De Santana V. F., De Oliveira R., Almeida L. D. A., Baranauskas M. C. C., 2012. Web Accessibility and People with Dyslexia, in *Proceedings of the International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A'12)*.
- Dellaporta A., 2007. Web Accessibility and the Needs of Users with Disabilities, in *Advances in Universal Web Design and Evaluation: Research, Trends and Opportunities*. IGI Global, 2007, pp. 1-24.
- Denis C., Karsenty L., 2005. Inter-Usability of Multi-Device Systems – A Conceptual Framework. In *Multiple User Interfaces: Cross-Platform Applications and Context-Aware Interfaces*, 2005, pp. 373 - 385.
- Dernoncourt F., 2011. La Logique Floue : le raisonnement humain au cœur du système décisionnel ? Conservatoire National des Arts et Métiers, Mémoire de NFE211, Ingénierie des systèmes décisionnels.
- Desruelle H., Blomme D. et Gielen F., 2011. Adaptive Mobile Web Applications: A Quantitative Evaluation Approach, in *International Conference on Web Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 375-378.
- Deuff D., Cosquer M., 2013. User-Centered Agile Method. FOCUS Series, Wiley-ISTE Ed., First edition, 127 pages, ISBN 978-1848214538.
- Dey A.K., 2001. Understanding and Using Context, in *Personal Ubiquitous Computing*, 5 (1), pp. 4-7.
- Edmonds E.A., 1981. Adaptive Man-Computer Interfaces. In Coombs, M. J. and Alty, J. L., (Eds.), *Computing Skills and the User Interfaces*. Academic Press, London.

- Enquête ANDRH, 2020. Les DRH face à la crise du COVID-19. Enquête Flash ANDRH. Accessible en ligne : <https://www.andrh.fr/pressemedias/239/cp-les-drh-face-a-la-crise-du-covid-19>
- Etude Kantar, 2020. Baromètre mondial COVID-19 : Evolution des comportements et implications pour les marques. Accessible en ligne : <https://www.tns-sofres.com/communiqués-de-presse/barometre-covid-19-letude-mondiale-sur-les-attitudes-des-consommateurs-les-habitudes-et-attentes-medias-en-periode-de-pandemie>
- Fink J., Kobsa A. et Nill A., 1996. User-Oriented Adaptivity and Adaptability in the AVANTI Project. In: *Proceedings of Designing for the Web: Empirical Studies*. Redmond, WA.
- Firmenich S., Winckler M., Rossi G., Gordillo S., 2011. A Framework for Concern-Sensitive, Client-Side Adaptation. In: Auer S., Díaz O., Papadopoulos G.A. (eds) *Web Engineering*. ICWE 2011. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 6757, pp. 198-213. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Florins M., 2006. *Graceful Degradation: a Method for Designing Multiplatform Graphical User Interfaces*. Thèse de doctorat, Louvain-la-Neuve, Belgique.
- Gajos K. Z., Weld D. S., et Wobbrock J. O., 2010. Automatically Generating Personalized User Interfaces with Supple. *Artificial Intelligence*, 174 (12-13), August 2010, pp. 910-950.
- Gajos K., Weld D. S., 2005. Preference elicitation for interface optimization. In *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '05)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 173–182.
- Gajos K., Wobbrock J., Weld S., 2007. Automatically generating user interfaces adapted to users' motor and vision capabilities. In: *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 231–240. ACM, 2007.
- Galindo Losada J., 2019. *UI adaptation by using user emotion*. PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2019. NNT: 2019GREAM021. tel-02297775.
- Genaro Motti V., Mezhoudi N., Vanderdonck J., 2012. Machine Learning in the Support of Context-Aware Adaptation. *Workshop on Context-Aware Adaptation of Service Front-Ends (Pisa, 13/11/2012)*. In: Francisco Javier Caminero Gil, Fabio Paternò, Jean Vanderdonck, *Proceedings of the Workshop on Context-Aware Adaptation of Service Front-Ends, 2012*.
- Gerst-Emerson K., Jayawardhana J., 2015. Loneliness as a public health issue: The impact of loneliness on health care utilization among older adults. In: *American Journal of Public Health*, 105(5), pp. 1013–1019.
- Ghiani G., Manca M., Paternò F., Santoro C., 2017. Personalization of Context-Dependent Applications Through Trigger-Action Rules. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 24(2), article 14, 33 pages.
- Giuffrida T., Dupuy-Chessa S., Poli J.-P. et Céret É., 2018. Fuzzy4U: a fuzzy logic system for user interfaces adaptation. In *Proceedings of the 30th Conference on l'Interaction Homme-Machine (IHM '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 52–62.

- Giuffrida T., Dupuy-Chessa S., Poli J.-P. et Céret É., 2019. "Fuzzy4U: A fuzzy logic system for user interfaces adaptation," 13th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS), Brussels, Belgium, 2019, pp. 1-12.
- GlobalWebIndex, 2019. GlobalWebIndex's flagship report on device ownership and usage. Flagship Report 2019.
- Goncalves J., Sarsenbayeva Z., Van Berkel N., Luo C., Hosio S., Risanen S., Rintamäki H., Kostakos V., 2017. Tapping task performance on smartphones in cold temperature. *Interacting with Computers* 29, 3 (2017), pp. 355–367.
- Hariri A., Tabary D., Lepreux S., Kolski C., 2008. Context aware business adaptation toward user interface adaptation. *Communications of SIWN*, 3, pp. 46-52.
- Hart S. G., Staveland L. E., 1988. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. Editor(s): Peter A. Hancock, Najmedin Meshkati, *Advances in Psychology*, North-Holland, vol. 52, 1988, pp. 139-183, ISSN 0166-4115, ISBN 9780444703880.
- Haut conseil de la famille, de l'enfance et de l'âge (HCFEA), 2019. Avis du Conseil de l'âge sur la démarche Monalisa et sur la politique de maintien du lien social et de lutte contre l'isolement des personnes âgées, adopté le 16 mai 2019, <http://www.hcfea.fr>.
- Henry S.L., 2006. Understanding Web Accessibility. In: *Web Accessibility*, pp 1-51. Apress.
- Hersh H. M., Caramazza A., 1976. A fuzzy set approach to modifiers and vagueness in natural language. In *Journal of Experimental Psychology: General*, 105(3), pp. 254–276.
- Holt-Lunstad J., Smith T., Baker M., Harris T., Stephenson D., 2015. Loneliness and Social Isolation as Risk Factors for Mortality: A Meta-Analytic Review. *Perspectives on Psychological Science*, 10, pp. 227-237.
- Horton S., Quesenberry W., 2014. *A Web for Everyone: Designing Accessible User Experiences*, Rosenfeld Media ed., 288 pages.
- Iaccarino G., Malandrino D., Del Percio M., Scarano V., 2006. Efficient Edge-Services for Colorblind Users. Proceedings of the 15th international conference on World Wide Web (WWW'06), Edinburgh, Scotland.
- INSEE, 2017. « D'ici 2050, la population augmenterait dans toutes les régions de métropole ». Insee Première No 1652. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2867738>
- ISO 9241-11:2018. Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability: Definitions and concepts. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-2:v1:en>
- ISO 9241-210:2010. Ergonomics of Human-System Interaction - Part 210: Human-centred Design for Interactive Systems. 2010. ISO, Geneva, Switzerland.
- Jasberg K., Sizov S., 2018. Neuroscientific User Models: The Source of Uncertain User Feedback and Potentials for Improving Web Personalisation. In: Hacid H., Cellary W., Wang H., Paik HY.,

- Zhou R. (Eds.) Web Information Systems Engineering (WISE 2018). WISE 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 11234. Springer, Cham.
- Jin Y., 2000. Fuzzy modeling of high-dimensional systems: complexity reduction and interpretability improvement, in IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 8, no. 2, pp. 212-221, April 2000.
- Jones M., Marsden G., Mohd-Nasir N., Boone K., Buchanan G., 1999. Improving Web interaction on small displays. Computer Networks, 31(11-16), pp. 1129-1137.
- Jung S. G., An J., Kwak H., Salminen J., Jansen B. J., 2018. Assessing the Accuracy of Four Popular Face Recognition Tools for Inferring Gender, Age, and Race. In Twelfth International AAAI Conference on Web and Social Media. Palo Alto, California USA, June 25-28, pp. 624-627.
- Jupp J., Langdon P., Godsill S., 2007. Mobile Computing in Maintenance Activities: A 'Situational Induced Impairments and Disabilities' Perspective. In: Stephanidis C. (eds) Universal Access in Human Computer Interaction. Coping with Diversity. UAHCI 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4554. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Kane S. K., Wobbrock J. O., Smith I. E., 2008. Getting off the treadmill: evaluating walking user interfaces for mobile devices in public spaces. In Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services (MobileHCI '08). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 109-118.
- Kolekar S. V., Pai R. M. et Manohara M. M., 2018. Rule-based Adaptive User Interface for Adaptive E-learning System. In Education and Information Technologies vol. 24, issue 1, pp. 613-641.
- Kolski C., Le Strugeon E., 1998. A Review of Intelligent Human-Machine Interfaces in the Light of the ARCH model. International Journal of Human-Computer Interaction, 10 (3), pp. 193-231.
- Kurniawan S. H., King A., Evans D. G., Blenkhorn P. L., 2006. Personalising Web Page Presentation for Older People. Interacting with computers, 18(3), pp. 457-477.
- Ladouceur N., 2005. Method and device for setting or varying properties of elements on a visual display based on ambient light, brevet US US20070146356A1, BlackBerry Ltd.
- Lallemant C., Gronier G., 2015. Méthodes de design UX : 30 méthodes fondamentales pour concevoir et évaluer les systèmes interactifs. Editions Eyrolles, 2015.
- Law E. L.-C., Roto V., Hassenzahl M., Vermeeren A. P.O.S., Kort J., 2009. Understanding, Scoping and Defining User Experience: A Survey Approach. In Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '09). ACM, New York, NY, USA, pp. 719-728.
- Lehmann G., Rieger A., Blumendorf M., Albayrak S., 2010. A 3-layer Architecture for Smart Environment Models. In 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, Mannheim, pp. 636-641.

- Leuteritz J.-P., Widlroither H., Mourouzis A., Panou M., Antona M., Leonidis A., 2009. Development of Open Platform Based Adaptive HCI Concepts for Elderly Users. In Lecture Notes in Computer Science, vol. 5615, 2009.
- Limbourg Q., Vanderdonckt J., 2004. Multimodality and Context-Aware Adaptation. In: Jacquart R. (eds) Building the Information Society. IFIP International Federation for Information Processing, vol. 156. Springer, Boston, MA.
- Limbourg Q., Vanderdonckt J., 2005. Transformational Development of User Interfaces with Graph Transformations. In: Jacob R.J., Limbourg Q., Vanderdonckt J. (eds) Computer-Aided Design of User Interfaces IV. Springer, Dordrecht.
- Lin M., Goldman R., Price K. J., Sears A., Jacko J., 2007. How do people tap when walking? An empirical investigation of nomadic data entry. *International Journal of Human-Computer Studies* 65 (9), pp. 759-769.
- Lin M., Price K. J., Goldman R., Sears A., Jacko J., 2005. Tapping on the move—Fitts' law under mobile conditions. *Proceedings of the 16th Annual Information Resources Management Association International Conference (IRMA '05)*. Hershey, PA: Idea Group, pp. 132-135.
- Loranger H., 2017. Plain Language Is for Everyone, Even Experts. Nielsen Norman Group. Accessible en ligne : <https://www.nngroup.com/articles/plain-language-experts/>.
- Lord S. R., Delbaere K., Gandevia S. C., 2015. Use of a physiological profile to document motor impairment in ageing and in clinical groups. *The Journal of Physiology*, 594(16), pp. 4513–4523.
- Lütjen M., Kreowski H.-J., Franke M., Thoben K.-D., Freitag M., 2014. Model-driven Logistics Engineering – Challenges of Model and Object Transformation. *Procedia Technology*, vol. 15, pp. 303-312. ISSN 2212-0173.
- Marçal de Oliveira K., Girard P., Guidini Gonçalves T., Lepreux S., Kolski C., 2015. Teaching Task Analysis for User Interface Design: Lessons Learned from Three Pilot Studies. In *Proceedings of the 27th Conference on l'Interaction Homme-Machine (IHM '15)*. ACM, New York, NY, USA, Article 31, 6 pages.
- Märtin C., Rashid S., Herdin C., 2016. Designing Responsive Interactive Applications by Emotion-Tracking and Pattern-Based Dynamic User Interface Adaptation. *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 28–36.
- McCarthy J.E., Swierenga S.J., 2010. What we know about dyslexia and Web accessibility: a research review. *Univ Access Inf Soc* 9, pp. 147–152.
- McKone T., Deshpande A., 2005. Can Fuzzy Logic Bring Complex Environmental Problems into Focus?. *Environmental science & technology*. 39. 42A-47A.
- Meixner G., Paternò F., Vanderdonckt J., 2011. Past, Present, and Future of Model-Based User Interface Development. *i-com* 10, 3 (November 2011), 2–10.

- Miñón R., Paternò F., Arrue M., Abascal J., 2016. Integrating Adaptation Rules for People with Special Needs in Model-based UI Development Process. *Universal Access in the Information Society*, 15 (1), pp. 153-168.
- Mochizuki R., Nakamura T., Chao J., Lenz R., 2008. Color-weak Correction by Discrimination Threshold Matching, in *Conference on Colour in Graphics, Imaging, and Vision*, vol. 2008, n° 1, pp. 208-213, Society for Imaging Science and Technology.
- Morrow-Howell N., Galucia N., Swinford E., 2020. Recovering from the COVID-19 Pandemic: A Focus on Older Adults. In *Journal of Aging & Social Policy*, 32:4-5, pp. 526-535.
- Moss G., 2009. *Gender, Design and Marketing: How Gender Drives our Perception of Design and Marketing*, Gower.
- Mussbacher G., Amyot D., Breu R., Bruel J.-M., Cheng B.H.C., Collet P., Combemale B., France R.B., Haldal R., Hill J., Kienzle J., Schöttle M., Steimann F., Stikkolorum D., Whittle J., 2014. The Relevance of Model-Driven Engineering Thirty Years from Now. In *Model-Driven Engineering Languages and Systems (MODELS'14)*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 8767, pp. 183-200.
- Mustonen T., Olkkonen M., Häkkinen J., 2004. Examining mobile phone text legibility while walking. *Extended Abstracts of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04)*. New York: ACM Press, pp. 1243-1246.
- Myers B., Hudson S. E., et Pausch R., 2000. Past, Present, and Future of User Interface Software Tools. *ACM Transaction on Computer-Human. Interaction (TOCHI)*, 7 (1), (March 2000), pp. 3-28.
- MyUI project Official Web Page. Accessible à l'adresse : <http://www.myui.eu/>
- MyUI Pattern Browser, 2013. Accessible à l'adresse : <http://myuipatterns.clevercherry.com/>
- Nguyen T.-D., Vanderdonck J., Seffah A., 2016. UIPLML: A Pattern Tool for Engineering Multi-Platforms Information Systems. In *Tenth International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS)*, June 1-3, 2016, Grenoble, France.
- Nicolau H., 2012. Disabled "R" all: bridging the gap between health and situational induced impairments and disabilities. *SIGACCESS Access. Comput.*, 102 (January 2012), pp. 21-24.
- Nielsen J., Mack R. L., 1994. *Usability inspection methods*, New York: John Wiley & Sons, 1994.
- Nielsen J., Molich R., 1990. Heuristic evaluation of user interfaces. In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. Mars 1990. pp. 249-256.
- Nyongesa H. O., Shicheng T., Maleki-Dizaji S., Huang S. T. et Siddiqi J., 2003. Adaptive Web Interface Design Using Fuzzy Logic, in *Proceedings IEEE/WIC International Conference on Web Intelligence (WI 2003)*, pp. 671-674.
- Observatoire des territoires, 2017. Le vieillissement de la population et ses enjeux. <https://www.observatoire-des-territoires.gouv.fr/observatoire-des-territoires/fr/le-vieillissement-de-la-population-et-ses-enjeux>

- Oulasvirta A., Tamminen A., Roto V., Kuorelahti J., 2005. Interaction in 4-second bursts: The fragmented nature of attentional resources in mobile HCI. Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '05). New York: ACM Press, pp. 919-928.
- Papatheocharous E., Belk M., Germanakos P., Samaras G., 2012. Proposing a Fuzzy Adaptation Mechanism Based on Cognitive Factors of Users for Web Personalization. in 8th International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations (AIAI), Sept. 2012, Halkidiki, Greece, pp.135-144.
- Paternò F., Santoro C., Spano L. D., 2009. MARIA: A Universal, Declarative, Multiple Abstraction-level Language for Service-oriented Applications in Ubiquitous Environments. ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), vol. 16, Issue 4, article 19, pp. 1-30.
- Pedrycz W., 1994. Why triangular membership functions? Fuzzy Sets and Systems, 64(1), pp. 21–30.
- Peissner M., Häbe D., Janssen D. et Sellner T., 2012. MyUI: Generating Accessible User Interfaces from Multimodal Design Patterns. In Proceedings of the 4th ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems, New York.
- Qian H., Kuber R. Sears A., 2013. Tactile notifications for ambulatory users. In Extended Abstracts CHI'13, pp. 1569-1574.
- Quillion-Dupré L., Monfort E., Rialle V., 2018. Tablette tactile et adultes âgés, Apports d'un programme d'initiation adapté aux troubles neurocognitifs, Education & Formation – e-311, Novembre 2018, pp. 43-59.
- Rello L., Baeza-Yates R., 2013. Good fonts for dyslexia. In Proceedings of the 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, 2013.
- Rello L., Kanvinde G., Baeza-Yates R., 2012. Layout Guidelines for Web Text and a Web Service to Improve Accessibility for Dyslexics. in Proceedings of the International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A'12).
- Rello L., Pielot M., Marcord M.-C., 2013. Size Matters (Spacing Not): 18 points for a Dyslexic-friendly Wikipedia. in Proceedings of the 10th ACM International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility (W4A'13), Rio de Janeiro, Brazil, pp.1-4.
- Rempel A. G., Mantuik R., Heidrich W., 2011. Display Considerations for Improved Night Vision Performance. in Proceedings of the 19th Color and Imaging Conference, pp. 191-194(4), Society for Imaging Science and Technology pub.
- Retalis S., Georgiakakis P., Dimitriadis Y., 2006. Eliciting design patterns for e-learning systems, Computer Science Education, 16:2, pp. 105-118.
- Richards J. T., Hanson V. L., 2004. Web accessibility: a broader view. In Proceedings of the 13th ACM international conference on World Wide Web, pp. 72-79.

- Riding R., Cheema I. 1991. Cognitive Styles — an Overview and Integration. In *Educational Psychology*, vol. 11, pp. 193-215.
- Rieger C., Lucrédio D., Fortes R., Kuchen H., Dias F., Duarte L., 2020. A model-driven approach to cross-platform development of accessible business apps. In *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing (SAC '20)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 984–993.
- Roche A., 2015. Proposition d'une méthode de conception systémique d'interface homme-système adaptée aux situations de multihandicap. Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 2015. Français.
- Sarsenbayeva Z., Goncalves J., García J., Klakegg S., Rissanen S., Rintamäki H., Hannu J., Kostakos V., 2016. Situational impairments to mobile interaction in cold environments. In *Proc. UbiComp'16, ACM (New York, NY, USA, 2016)*, pp. 85–96.
- Sarsenbayeva Z., Kostakos V., Goncalves J., 2019. Situationally-Induced Impairments and Disabilities Research. arXiv preprint arXiv:1904.06128.
- Saulynas S., Kuber R., 2019. Designing Mobile Interaction Guidelines to Account for Situationally Induced Impairments and Disabilities (SIID) and Severely Constraining Situational Impairments (SCSI). arXiv preprint arXiv:1904.06129.
- Schedlbauer M., Heines J., 2007. Selecting while walking: An investigation of aiming performance in a mobile work context. *Proceedings of the 13th Americas Conference on Information Systems (AMCIS '07)*. Atlanta, GA: Association for Information Systems.
- Schildbach B., Rukzio E., 2010. Investigating selection and reading performance on a mobile phone while walking. In *Proc. MobileHCI'10*, pp. 93-102.
- Schmutz S., Sonderegger A., Sauer J., 2017. Effects of Accessible Website Design on Nondisabled Users: Age and Device as Moderating Factors. In *Ergonomics* 61, pp. 1-39.
- Schneider-Hufschmidt M., Kühme T., Malinkowski U., 1993. *Adaptive User Interfaces: Principles and Practice*. North Holland.
- Seals D. R., Justice J. N., LaRocca T. J., 2015. Physiological geroscience: targeting function to increase healthspan and achieve optimal longevity. *The Journal of Physiology*, 594(8), pp. 2001–2024.
- Sears A., Lin M., Jacko J., Xiao Y., 2003. When computers fade... Pervasive computing and situationally-induced impairments and disabilities. In: *Proceedings of the 10th international conference on human-computer interaction (HCI Int'03)*. Lawrence Erlbaum, Mahwah, pp. 1298–1302.
- Sears A., Young M., 2003. Physical disabilities and computing technologies: an analysis of impairments. In: Jacko JA, Sears A (eds) *The human-computer interaction handbook*, 1st edn. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, pp. 482–503.

Serenoa Project, deliverable 3.3.2 AAL-DL: Semantics, Syntaxes and Stylistics. http://hiis.isti.cnr.it/serenoa/uploads/2013/09/SERENOA_D3.3.2.pdf

Sondage Odoxa-CGI, 2020. Les Français pendant le confinement : logement, situation familiale, occupations et solidarité. Baromètre des territoires réalisé par Odoxa-CGI. Accessible en ligne : <http://www.odoxa.fr/sondage/quotidien-francais-confines/>

Sottet J.S., Ganneau V., Calvary G., Coutaz J., Demeure A., Favre J.-M., Demumieux R., 2007. Model-Driven Adaptation for Plastic User Interfaces. In: Baranauskas C., Palanque P., Abascal J., Barbosa S.D.J. (Eds.) Human-Computer Interaction – INTERACT 2007. Lecture Notes in Computer Science, vol. 4662. Springer, Berlin, Heidelberg.

Sottet JS., Calvary G., Favre JM., Coutaz J., Demeure A. et Balme L., 2006. Towards Model Driven Engineering of Plastic User Interfaces. In: Bruel JM. (eds) Satellite Events at the MoDELS 2005 Conference. MODELS 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol. 3844. Springer, Berlin, Heidelberg.

Soui M., Abed M. et Ghedira K., 2013. Fuzzy Logic Approach for Adaptive Systems Design. In: Kurosu M. (Eds.) Human-Computer Interaction. Towards Intelligent and Implicit Interaction. HCI 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol. 8008. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 141-150.

Stephanidis C., Paramythis A., Sfyraakis M., Stergiou A., Maou N., Leventis A., Paparoulis G. et Karagiannidis C., 2006. «Adaptable and adaptive user interfaces for disabled users in the AVANTI project» in Proceedings of the 5th International Conference on Intelligence and Services in Networks: Technology for Ubiquitous Telecom Services, 2006.

Thevenin D., Coutaz J., 1999. Plasticity of User Interfaces: Framework and Research Agenda. Proceeding of IFIP Conference on Human Computer Interaction INTERACT. August 30 – September 3, 1999. Edinburgh, Scotland. Sasse, A. and Johnson, C. (Eds.), IFIPIOS Press.

Thevenin D., Coutaz J., Calvary G., 2003. A Reference Framework for the Development of Plastic User Interfaces. In Multi-Device and Multi-Context User Interfaces: Engineering and Applications Frameworks. Seffah A. and H. Javahery (Eds.), NJ, USA, 2003. pp. 27–51

Tigwell G. W., Sarsenbayeva Z., Gorman B. M., Flatla D. R., Goncalves J., Yesilada Y., Wobbrock J. O., 2019. Addressing the Challenges of Situationally-Induced Impairments and Disabilities in Mobile Interaction. In Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '19). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper W30, pp. 1–8.

Vadas K., Patel N., Lyons K., Starner T., Jacko J., 2006. Reading on-the-go: A comparison of audio and hand-held displays. Proceedings of the ACM Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services (MobileHCI '06). New York: ACM Press, pp.219-226.

Virtual User Modeling and Simulation Cluster (VUMS), 2013. Accessible en ligne : http://vums.iti.gr/indexb60b.html?page_id=44.

W3C – Accessibility, Usability, and Inclusion. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/WAI/fundamentals/accessibility-usability-inclusion/>

W3C – Diverse Abilities and Barriers. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/WAI/people-use-web/abilities-barriers/>

W3C – EAPM (Exigences d'accessibilité pour les personnes malvoyantes), 2016. Accessibility Requirements for People with Low Vision. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/TR/low-vision-needs/>

W3C – Introduction to Web Accessibility. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/WAI/fundamentals/accessibility-intro/>

W3C – WAI (Web Accessibility Initiative), 2015. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/WAI/about/>

W3C – WAI-AGE (Web Accessibility Initiative: Ageing Education and Harmonisation), 2010. WAI Guidelines and Older Web Users: Findings from a Literature Review. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/WAI/WAI-AGE/comparative.html>

W3C – WCAG (Web Content Accessibility Guidelines), 2018. Accessible en ligne : <https://www.w3.org/WAI/standards-guidelines/wcag/>

Whittle J., Hutchinson J., Rouncefield M., 2014. The State of Practice in Model-Driven Engineering, *IEEE software*, 31(3), pp. 79-85.

Wobbrock J. O., 2019. Situationally-induced impairments and disabilities. In *Web Accessibility*, pp. 59-92. Springer, London.

Wobbrock J., 2019. Situationally Aware Mobile Devices for Overcoming Situational Impairments. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems (EICS '19)*. ACM, New York, NY, USA, pp. 1-18

Yang S.J. et Shao N.W., 2007. Enhancing Pervasive Web Accessibility with Rule-based Adaptation Strategy. *Expert Systems with Applications*, 32 (4), pp. 1154-1167.

Yang T., Linder J., Bolchini D., 2012. DEEP: Design-Oriented Evaluation of Perceived Usability, *International Journal of Human-Computer Interaction*, 28:5, pp. 308-346.

Yigitbas E., Jovanovikj I., Biermeier K., Sauer S., Engels G., 2020. Integrated model-driven development of self-adaptive user interfaces. In *Software and Systems Modeling (SoSyM) 2020*, pp. 1-25.

Yigitbas E., Sauer S., Engels G., 2017. Adapt-UI: an IDE Supporting Model-Driven Development of Self-adaptive UIs. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems*, Lisbon, 2017.

Zadeh L., 1965. Fuzzy sets. In *Information and Control*, 8 (3), pp. 338-353.

Zadeh L., 1975. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate. In *Information Sciences*, vol. 9, pp. 43-80.

Annexes

Annexe 1 : Liste des recommandations du WAI-AGE

Le groupe de travail WAI-AGE propose une liste de recommandation dans un document intitulé « Recommandations WAI et utilisateurs âgés du Web : résultats d'une analyse de la littérature » (« WAI Guidelines and Older Web Users : Findings from a Literature Review »), disponible en ligne à l'adresse suivante : <https://www.w3.org/WAI/WAI-AGE/comparative.html>.

Cette liste regroupe des recommandations sur la conception de pages Web accessibles pour les personnes âgées et les compare avec les Règles pour l'accessibilité des contenus web (Web Content Accessibility Guidelines - WCAG) [W3C – WCAG 2018] afin de définir des corrélations.

La première colonne des tableaux ci-dessous répertorie les recommandations qui ont été compilées à partir d'une analyse de la littérature sur l'accessibilité du Web pour les utilisateurs âgés (provenant des recommandations du WAI existantes, de différentes études scientifiques, ainsi que d'autres d'observations occasionnelles). La seconde colonne précise si la recommandation traitée référence une ou plusieurs recommandations du WCAG 2.0.

Les recommandations sont découpées en suivant les quatre principes du WCAG : perceptible, utilisable, compréhensible et robuste.

Remarque : les auteurs précisent que "n.a." signifie qu'aucun critère de succès WCAG 2.0 n'était applicable pour la recommandation concernée et qu'aucun commentaire n'était requis.

Principe « Perceptible »

Collected recommendations :	WCAG 2.0 Success criteria and/or guidelines
Use 12-14pt text size	1.4.4 Resize text ; 1.4.8 Visual Presentation
Use relative units for text and layout	1.4.4 Resize text ; 1.4.8 Visual Presentation
Provide text size adjustment link	1.4.4 Resize text
Use a sans serif font	1.4.8 Visual Presentation
Avoid bold body-text (except for emphasis)	n.a.
Avoid underlined text (do use for links)	n.a.
Avoid text in all capitals (use proper case)	1.4.8 Visual Presentation ; 3.1 Readable
Left justified text (with L2R scripts)	1.3.2 Meaningful Sequence ; 1.4.4 Resize text ; 1.4.8 Visual Presentation ; 3.1 Readable
Use increased line spacing	1.4.8 Visual Presentation
Provide sufficient (high) contrast	1.4.1 Use of Color ; 1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.6 Contrast (Enhanced)

Avoid blues and greens with black	1.4.1 Use of Color ; 1.4.3 Contrast (Minimum)
Avoid fluorescent colors	n.a.
Use dark text on light background	1.4.8 Visual Presentation ; 1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.6 Contrast (Enhanced)
Avoid patterned backgrounds	1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.6 Contrast (Enhanced)
Use HTML rather than images or multimedia for text-based information	1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.4 Resize text ; 1.4.5 Images of Text ; 1.4.6 Contrast (Enhanced) ; 1.4.8 Visual Presentation ; 1.4.9 Images of Text (No Exception)
Provide 'white space' page margins	1.4.8 Visual Presentation
Avoid horizontal scrolling	1.4.8 Visual Presentation
Do not indicate required form fields with just an asterisk - use text	1.4.1 Use of Color
Ensure links are blue and underlined	1.4.1 Use of Color ; 1.4.8 Visual Presentation ; 2.4 Navigable
Ensure links change colour after visit	n.a.
Ensure links are visibly different when they have focus	1.4.1 Use of Color ; 2.4.7 Focus Visible
Combine images and links with the same destination	1.1.1 Non-text Content ; 2.4.9 Link Purpose (Link Only)
Present links as lists	1.4.8 Visual Presentation
Clearly separate links	n.a.
Links should be large in size	1.4.4 Resize text
Provide a text equivalent for images	1.1.1 Non-text Content
Provide captions and/or transcripts for video and animations	1.2.1 Audio-only and Video-only (Prerecorded) ; 1.2.2 Captions (Prerecorded) ; 1.2.4 Captions (Live) ; 1.2.8 Full Text Alternative
Don't use colour alone to portray information	1.3.1 Info and Relationships ; 1.4.1 Use of Color
Use style sheets for presentation and layout	1.3.1 Info and Relationships ; 1.4.5 Images of Text ; 1.4.9 Images of Text (No Exception)
Provide a linear alternative to pages using table layout	1.3.1 Info and Relationships ; 2.4.10 Section Headings
Make search results visible in normal view-port	n.a.
Make sure the user notices small page changes/updates	n.a.
Use relative units for text and layout	1.4.4 Resize text ; 1.4.8 Visual Presentation
Provide text size adjustment link	1.4.4 Resize text
Use a sans serif font	1.4.8 Visual Presentation

Avoid bold body-text (except for emphasis)	n.a.
Avoid underlined text (do use for links)	n.a.
Avoid text in all capitals (use proper case)	1.4.8 Visual Presentation ; 3.1 Readable
Left justified text (with L2R scripts)	1.3.2 Meaningful Sequence ; 1.4.4 Resize text ; 1.4.8 Visual Presentation ; 3.1 Readable
Use increased line spacing	1.4.8 Visual Presentation
Provide sufficient (high) contrast	1.4.1 Use of Color ; 1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.6 Contrast (Enhanced)
Avoid blues and greens with black	1.4.1 Use of Color ; 1.4.3 Contrast (Minimum)
Avoid fluorescent colors	n.a.
Use dark text on light background	1.4.8 Visual Presentation ; 1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.6 Contrast (Enhanced)
Avoid patterned backgrounds	1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.6 Contrast (Enhanced)
Use HTML rather than images or multimedia for text-based information	1.4.3 Contrast (Minimum) ; 1.4.4 Resize text ; 1.4.5 Images of Text ; 1.4.6 Contrast (Enhanced) ; 1.4.8 Visual Presentation ; 1.4.9 Images of Text (No Exception)
Provide 'white space' page margins	1.4.8 Visual Presentation
Avoid horizontal scrolling	1.4.8 Visual Presentation
Do not indicate required form fields with just an asterisk - use text	1.4.1 Use of Color
Ensure links are blue and underlined	1.4.1 Use of Color ; 1.4.8 Visual Presentation ; 2.4 Navigable
Ensure links change colour after visit	n.a.
Ensure links are visibly different when they have focus	1.4.1 Use of Color ; 2.4.7 Focus Visible
Combine images and links with the same destination	1.1.1 Non-text Content ; 2.4.9 Link Purpose (Link Only)
Present links as lists	1.4.8 Visual Presentation
Clearly separate links	n.a.
Links should be large in size	1.4.4 Resize text
Provide a text equivalent for images	1.1.1 Non-text Content
Provide captions and/or transcripts for video and animations	1.2.1 Audio-only and Video-only (Prerecorded) ; 1.2.2 Captions (Prerecorded) ; 1.2.4 Captions (Live) ; 1.2.8 Full Text Alternative

Don't use colour alone to portray information	1.3.1 Info and Relationships ; 1.4.1 Use of Color
Use style sheets for presentation and layout	1.3.1 Info and Relationships ; 1.4.5 Images of Text ; 1.4.9 Images of Text (No Exception)
Provide a linear alternative to pages using table layout	1.3.1 Info and Relationships ; 2.4.10 Section Headings
Make search results visible in normal view-port	n.a.
Make sure the user notices small page changes/updates	n.a.

Principe « Utilisable »

Collected recommendations :	WCAG 2.0 Success criteria and/or guidelines
Avoid moving (and scrolling) text	2.2.1 Timing Adjustable ; 2.2.2 Pause, Stop, Hide
Use static menus (not fly-out / pull-down)	n.a.
Provide clean pages; avoid clutter; avoid irrelevant material to the main content	2.4 Navigable
Clearly separate links	n.a.
Don't disable the "back" button (don't break the browsers history functionality)	n.a.
Provide "breadcrumbs"	2.4.8 Location
Provide true home page link on all pages of site	2.4.8 Location
Ensure the 'search' function covers whole site	2.4.5 Multiple Ways
Ensure the 'search' function is labeled	2.4.6 Headings and Labels ; 3.3.2 Labels or Instructions
Avoid blinking content	2.2.2 Pause, Stop, Hide
Avoid animations (unless requested)	2.2.2 Pause, Stop, Hide
Do not automatically refresh pages	2.2.4 Interruptions
Use device-independent event handlers	2.1.1 Keyboard
Ensure logical tabbing order	2.4.3 Focus Order
Provide clear links	2.4.4 Link Purpose (In Context) ; 2.4.9 Link Purpose (Link Only)
Provide a site-map	2.4.5 Multiple Ways ; 2.4.8 Location
Provide a navigation menu	2.4.5 Multiple Ways
If pop-up windows used, then the full message is displayed	n.a.
Undertake user testing	Understanding Conformance

Principe « Compréhensible »

Collected recommendations :	WCAG 2.0 Success criteria and/or guidelines
Avoid text in all capitals (use proper case)	1.4.8 Visual Presentation ; 3.1 Readable

Left justified text (with L2R scripts)	1.4.4 Resize text; 3.1 Readable
Provide Previous/Next page links (where appropriate)	n.a.
Avoid pop-ups or new windows	3.2.2 On Input
If pop-up windows used, then the full message is displayed	n.a.
Provide Help &/or FAQ's for the site	3.3.2 Labels or Instructions
Provide instructions for form completion	3.3.2 Labels or Instructions
Provide clear error messages for forms	3.3.1 Error Identification; 3.3.3 Error Suggestion
Accommodate misspellings, hyphens and common variations within forms	3.3.5 Help; 3.3.3 Error Suggestion
Provide clear/consistent branding on all pages	3.2.4 Consistent Identification
Provide an "About us" and/or "Contacts" page	3.1 Readable
Ensure search function is tolerant of misspellings	3.3.5 Help
Ensure the 'search' function is labeled	2.4.6 Headings and Labels; 3.3.2 Labels or Instructions
Use an active voice for writing	3.1.5 Reading Level
Use short sentences and paragraphs	3.1.5 Reading Level
Use short pages	n.a.
Provide consistent navigation	3.2.3 Consistent Navigation
Write clearly with important information at the start	3.1 Readable
Include a glossary (especially for technical terms)	3.1.3 Unusual Words; 3.1.4 Abbreviations; 3.1.6 Pronunciation
Only use icons and graphics that are relevant to the topic or that aid comprehension and understanding	3.1 Readable
Ensure search query is repeated on search results page	n.a.
Group like information	n.a.

Principe « Robuste »

Collected recommendations :	WCAG 2.0 Success criteria and/or guidelines
Use valid code	4.1.1 Parsing
Avoid making users download documents (provide material as HTML where appropriate)	n.a.
Pages should function without scripting support	n.a.
Consider page download speed - create 'small' pages	n.a.
Do not require 'double clicks'	n.a.

Annexe 2 : Liste des règles d'adaptation implémentées dans Fuzzy4U

Catégorie Utilisateur

```

If age is elderly      then animation is false
If non(age is elderly) then animation is true

If age is elderly      then letterSpacing is high
If age is adult        then letterSpacing is medium
If age is young        then letterSpacing is classic

If age is elderly      then wordSpacing is high
If age is adult        then wordSpacing is medium
If age is young        then wordSpacing is classic

If age is elderly      then lineHeight is high
If age is adult        then lineHeight is medium
If age is young        then lineHeight is classic

If age is elderly      then font is elderly
If non(age is elderly) then font is classic

If age is elderly      then fontSize is bigger
If non(age is elderly) then fontSize is lowering

If colorVision is default  then colorPalet is allColors
If colorVision is deuteranope then colorPalet is noGreen
If colorVision is tritanope  then colorPalet is noBlue
If colorVision is protanope  then colorPalet is noRed
If colorVision is achromate  then colorPalet is noColor

If staticTremor is true     then multipleKeyPressedUse is false
If staticTremor is false   then multipleKeyPressedUse is true
If staticTremor is true     then multipleClickUse is false
If staticTremor is false   then multipleClickUse is true
If staticTremor is true     then pointerStabilization is true
If staticTremor is false   then pointerStabilization is false

If attention is normal      then eyeCandy is true
If non(attention is normal) then eyeCandy is false
If (languageReception is normal or languageReception is low)      then
displayMode is textOnly
If (languageReception is veryLow or languageReception is extraLow) then
displayMode is textAndGraphics

If dyslexia is none         then listType is classic
If non(dyslexia is none)   then listType is ordered
If dyslexia is none         then letterSpacing is classic
If dyslexia is light       then letterSpacing is medium
If dyslexia is strong       then letterSpacing is high

```

```

If dyslexia is none           then lineHeight is classic
If dyslexia is light         then lineHeight is medium
If dyslexia is strong        then lineHeight is high
If dyslexia is strong        then textAlign is left
If non(dyslexia is strong)   then textAlign is classic
If dyslexia is none          then wordSpacing is classic
If dyslexia is light         then wordSpacing is medium
If dyslexia is strong        then wordSpacing is high
If dyslexia is none          then font is classic
If non(dyslexia is none)     then font is dyslexia
If dyslexia is none          then fontSize is lowering
If non(dyslexia is none)     then fontSize is bigger

If (ictExperience is normal or ictExperience is low) then
confirmationLevel is medium
If non(ictExperience is normal or ictExperience is low) then
confirmationLevel is high
If (ictExperience is normal or ictExperience is low) then displayMode
is medium
If non(ictExperience is normal or ictExperience is low) then displayMode
is high
If (ictExperience is normal or ictExperience is low) then
useHyperLinks is true
If non(ictExperience is normal or ictExperience is low) then
useHyperLinks is false
If (ictExperience is normal or ictExperience is low) then
guidanceLevel is medium
If non(ictExperience is normal or ictExperience is low) then
guidanceLevel is high

If (abstractSignsUnderstanding is normal or abstractSignsUnderstanding is
low) then displayMode is textOnly
If non(abstractSignsUnderstanding is normal or abstractSignsUnderstanding is
low) then displayMode is textAndGraphics

If (itExperience is normal or itExperience is low) then
guidanceLevel is medium
If non(itExperience is normal or itExperience is low) then
guidanceLevel is high

If languageReception is normal then verbose is thorough
If languageReception is low then verbose is summarized
If languageReception is veryLow then verbose is concise
If languageReception is extraLow then verbose is laconic

If attention is normal then verbose is thorough
If attention is low then verbose is summarized
If attention is veryLow then verbose is concise
If attention is extraLow then verbose is laconic

```

If handPrecision is normal	then clickCorrection is noCorrection
If handPrecision is low	then clickCorrection is lowCorrection
If handPrecision is veryLow	then clickCorrection is mediumCorrection
If handPrecision is extraLow	then clickCorrection is highCorrection
If visualAcuity is normal	then clickCorrection is noCorrection
If visualAcuity is low	then clickCorrection is lowCorrection
If visualAcuity is veryLow	then clickCorrection is mediumCorrection
If visualAcuity is extraLow	then clickCorrection is highCorrection
If visualAcuity_fontSize is lowering	then fontSize is lowering
If visualAcuity_fontSize is bigger	then fontSize is bigger

Catégorie Plateforme

If deviceOrientation is landscape	then displayOrientation is landscape
If DeviceOrientation is portrait	then deviceOrientation is portrait
If screenHeight is bigScreen	then variantDevice is PC
If screenHeight is smallScreen	then variantDevice is smartphone
If screenWidth is bigScreen	then variantDevice is PC
If screenWidth is smallScreen	then variantDevice is smartphone

Catégorie Environnement

If brightness is dark	then devileLuminance is slow
If brightness is light	then deviceLuminance is medium
If brightness is daylight	then deviceLuminance is high
If brightness is sunlight	then deviceLuminance is maximum
If brightness is dark	then contrast is slow
If brightness is light	then contrast is medium
If brightness is daylight	then contrast is high
If brightness is sunlight	then contrast is veryHigh

Résumé

Avec la diffusion massive de l'utilisation d'Internet et de l'outil informatique en général, l'accessibilité des interfaces utilisateur est un besoin toujours plus prégnant. La facilité d'utilisation des dispositifs informatiques est en effet un point critique pour en favoriser l'adoption. Ainsi, les difficultés vécues par certains utilisateurs, tels que les personnes âgées ou en situation de difficultés neurocognitive, posent de façon plus aiguë la question de l'accessibilité. De nombreux travaux se sont penchés sur ce sujet afin de définir des recommandations d'accessibilité génériques ou situationnelles. Une approche possible est d'adapter les interfaces au contexte d'usage. Cependant, des difficultés demeurent, notamment liées à la complexité des contextes d'usage possibles, entraînant une multiplicité des caractéristiques à prendre en compte, une imprécision des valeurs attribuées à ces caractéristiques et la combinaison de multiples règles d'adaptation. Nous abordons ces trois verrous au travers de la question de recherche suivante : comment améliorer l'accessibilité des IHM par le biais d'interfaces adaptatives en prenant en compte la multiplicité des caractéristiques du contexte, l'imprécision des valeurs de contexte ainsi que la complexité et la combinaison des règles ?

En nous appuyant sur une architecture générique d'adaptation, nous proposons un moteur d'adaptation dynamique basé sur la logique floue, utilisé pour implémenter les préconisations en accessibilité. Nous montrons comment la logique floue permet de gérer les trois verrous identifiés au travers d'un prototype. Nous mettrons en avant ces avantages par rapport à une approche classique en logique booléenne. Afin de valider ces avantages, nous avons mené une analyse comparative entre les 2 types de règles (logiques floue et binaire) de manière théorique et avec une évaluation auprès d'experts. Les résultats valident l'intérêt de la logique floue pour l'adaptation des interfaces à des fins d'accessibilité.

Mots-clés : accessibilité, adaptation d'IHM, logique floue, logique booléenne, expérience utilisateur

Abstract

With the massive spread of the use of the Internet and the computer tool in general, the accessibility of user interfaces is an increasingly pressing need. Ease of use of computing devices is indeed a critical point in fostering adoption. Thus, the difficulties experienced by certain users, such as the elderly or in a situation of neurocognitive difficulties, require more acutely the question of accessibility. Much work has focused on this subject in order to define generic or situational accessibility recommendations. One possible approach is to adapt the interfaces to the context of use. However, difficulties remain, particularly linked to the complexity of the possible contexts of use, leading to a multiplicity of characteristics to be taken into account, an imprecision of the values assigned to these characteristics and the combination of multiple adaptation rules. We address these three obstacles through the following research question: how to improve the accessibility of UIs through adaptive interfaces by taking into account the multiplicity of context characteristics, the imprecision of context values; as well as the complexity and the combination of rules?

By relying on a generic adaptation architecture, we propose a dynamic adaptation engine based on fuzzy logic, used to implement accessibility recommendations. We show how fuzzy logic manages the three obstacles identified through a prototype. We will highlight these advantages compared to a classical approach in Boolean logic. In order to validate these advantages, we carried out a comparative analysis between the 2 types of rules (fuzzy and binary logic) in a theoretical way and with an evaluation by experts. The results validate the interest of fuzzy logic for adapting interfaces for accessibility purposes.

Keywords: accessibility, HCI adaptation, fuzzy logic, Boolean logic, user experience