



HAL
open science

Dialogue graphique intelligent, fondé sur une ontologie, pour une prothèse de mémoire

Fatma Ghorbel

► **To cite this version:**

Fatma Ghorbel. Dialogue graphique intelligent, fondé sur une ontologie, pour une prothèse de mémoire. Bio-informatique [q-bio.QM]. Conservatoire national des arts et métiers - CNAM; Université de Sfax (Tunisie). Faculté des Sciences économiques et de gestion, 2018. Français. NNT : 2018CNAM1181 . tel-01884550

HAL Id: tel-01884550

<https://theses.hal.science/tel-01884550>

Submitted on 1 Oct 2018

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.



le cnam

**ECOLE DOCTORALE D'INFORMATIQUE, TELECOMMUNICATIONS ET
ELECTRONIQUE
CENTRE D'ETUDE ET DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE ET
COMMUNICATIONS
FACULTE DES SCIENCES ECONOMIQUES ET DE GESTION DE SFAX
MULTIMEDIA, INFORMATION SYSTEMS AND ADVANCED COMPUTING
LABORATORY**

THÈSE présentée par :

Fatma GHORBEL

soutenue le : **10 juillet 2018**

pour obtenir le grade de : Docteur du Conservatoire National des Arts et Métiers et de
l'Université de Sfax

Discipline/ Spécialité : Informatique

**Dialogue graphique intelligent, fondé sur une ontologie, pour une
prothèse de mémoire**

THESE DIRIGEE PAR :

Pr Elisabeth METAIS

Professeur au CNAM, France

Dr Nebrasse ELLOUZE

Maître assistante à Enet'Com de Sfax, Tunisie

RAPPORTEURS :

Pr Rafik BOUAZIZ

Professeur à l'université de Sfax, Tunisie

Pr Farid MEZIANE

Professeur à l'université de Salford, Royaume Uni

EXAMINATEURS :

Pr Kamel BARKAOUI

Président du jury, Professeur au CNAM, France

Dr Didier NAKACHE

Manager de la Sécurité du Système d'Information, CRAMIF, France

Pr Max SILBERZTEIN

Professeur à l'université de Franche Comté, France

Dédicace

À mes très chers parents Ahmed et Thouraya

À mon frère Thameur et ma sœur Manel

À toute ma famille...

Remerciements

C'est avec une grande émotion et beaucoup de sincérité que je voudrais exprimer ma gratitude à toutes les personnes ayant participé, soutenu et apprécié mon travail.

Je tiens à remercier et exprimer toute ma reconnaissance auprès de mon directeur de thèse Pr. **Faiez GARGOURI** qui m'a initiée à la recherche et m'a toujours motivée, soutenue et encouragée. Meticuleux et perfectionniste, il m'a prodigué des conseils inestimables, dans tous les domaines, tout au long de ma thèse. Ses idées, son expérience et ses précieux conseils m'ont énormément aidée dans ce travail. Je le remercie pour son soutien et ses conseils nombreux et importants. Il a beaucoup contribué à la mise en valeur de mon travail, n'a cessé de m'encourager à avancer et m'a aidée à progresser à travers les difficultés et les doutes inhérents à tout travail de recherche.

Je souhaite remercier très vivement ma co-directrice de thèse Pr. **Elisabeth METAIS** qui m'a accueillie pendant de longs séjours au laboratoire Cedric du Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM), au cours desquels elle s'est montrée très disponible et accueillante pour discuter de mes travaux de thèse pendant de longues heures. Je la remercie également pour m'avoir guidée dans mes travaux, conseillée avec professionnalisme et une très grande expertise, sans jamais compter son temps et son énergie ni perdre sa bonne humeur et gentillesse. Ses apports très majeurs me permettent aujourd'hui de vous présenter cette thèse. Je la remercie aussi pour son soutien sur le **plan humain**. C'est elle qui règle toutes les procédures administratives au CNAM et les procédures suite à chaque article accepté. Et surtout, je ne peux pas oublier qu'elle s'est occupée de ma première inscription au CNAM alors qu'elle était souffrante. Aussi, elle s'est occupée de moi quand j'ai été malade lors de mon dernier stage de recherche. Je n'oublie pas son acharnement pour que mon oreille guérisse... J'espère pouvoir la rendre services un jour.

Je souhaite également remercier très chaleureusement ma co-encadrante, Dr. **Nebrasse ELLOUZE** pour l'intérêt et la disponibilité qu'elle a manifestée à l'égard de mes recherches ainsi que pour tous les conseils et encouragements dont j'ai bénéficié tout au long de ce travail. Qu'elle trouve ici le témoignage de tout mon respect et ma reconnaissance et du plaisir que j'ai eu à travailler avec elle tout au long de ma thèse.

Je remercie très chaleureusement Dr. **Fayçal HAMDI**, pour m'avoir encadrée. Je le remercie pour toute la patience et la disponibilité dont il a fait preuve à mon égard. Ses

conseils avisés, remarques constructives et encouragements m'ont permis d'améliorer grandement la qualité de mes travaux et de ce mémoire.

Qu'il me soit permis d'exprimer mes sincères remerciements à Pr. **Rafik BOUAZIZ** et Pr. **Farid MEZIANE** pour accepter d'être mes rapporteurs de thèse. J'exprime également toute ma gratitude à Pr. **Kamel BARKAOUI**, Dr. **Didier NAKACHE** et Pr. **Max SILBERZTEIN**, qui m'ont fait l'honneur d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi aux membres de l'équipe ISID pour les discussions scientifiques enrichissantes et l'ambiance amicale que nous avons partagée durant mes séjours au CNAM. Je remercie ma collègue et mon amie **Noura HERRADI**. Je remercie Dr. **Nadira LAMMARI** pour ses remarques très pertinentes lors de mes présentations. Je remercie vivement Mr. **Thierry TSI**.

Je tiens également à remercier les membres du laboratoire MIRACL. En particulier, je remercie mes collègues qui ont participé à l'évaluation de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph. Je remercie mon collègue **Firas ZEKRI** pour son aide et ses conseils.

Je ne souhaite pas oublier le personnel de l'administration pour leur attention et leur efficacité. Je remercie en particulier Mr. **Alexandre LESCAUT**.

Je remercie Dr. **Salma SAKKA**, médecin neurologue à l'hôpital HEDI CHAKER de Sfax en Tunisie, pour ses conseils judicieux et ses aides. Je remercie aussi les personnels de la maison de la retraite de Sfax en Tunisie et les malades d'Alzheimer qui ont participé aux évaluations effectuées dans le cadre de cette thèse.

Mes sentiments les plus chaleureux sont pour ma famille. Je remercie **mes chers parents Ahmed et Thouraya**, **ma sœur Manel** et **mon frère Thameur** qui m'ont toujours soutenue dans mes choix et qui m'ont toujours encouragée à aller de l'avant.

Enfin, je remercie toute ma famille qui habite à Paris. J'adresse un remerciement très approfondie à **Rim DRIRA** pour son accueil très chaleureux.

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une prothèse de mémoire « **intelligente** », appelée CAPTAIN MEMO, destinée aux malades d'Alzheimer, pour pallier leurs problèmes mnésiques. Cette prothèse est basée sur l'**ontologie temporelle, floue et multilingue** appelée MemoFuzzyOnto.

Cette prothèse offre **des interfaces accessibles** à cette classe particulière d'utilisateurs. Nous proposons, pour mettre en œuvre ces interfaces, une méthodologie de conception appelée InterfaceToAlz pour concevoir des interfaces accessibles aux malades d'Alzheimer, et qui offre un guide de 145 bonnes pratiques d'ergonomie.

De plus, nous proposons **un outil de visualisation d'ontologies** appelé Memo Graph qui génère un graphe dont la visualisation et la manipulation sont accessibles aux malades d'Alzheimer. Cette proposition est motivée par le fait que CAPTAIN MEMO a besoin de générer et d'éditer le graphe de la famille et de l'entourage du patient, à partir de l'ontologie MemoFuzzyOnto qui structure sa base de connaissances. Memo Graph est fondé sur notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie et notre approche, appelée Incremental Key-Instances Extraction and Visualisation, qui permet une extraction et une visualisation incrémentale du résumé des assertions ABox de l'ontologie. Il supporte également la visualisation des données ouvertes liées (Linked Data) et le passage à l'échelle.

Par ailleurs, nous proposons, dans le cadre de cette thèse, une **typologie de l'imperfection des données saisies** (principalement due à la discordance mnésique provoquée par la maladie), et une **méthodologie pour permettre à CAPTAIN MEMO d'être tolérante à la saisie des données fausses**. Nous proposons un modèle d'évaluation de la crédibilité et une approche, nommée Data Believability Estimation for Applications to Alzheimer Patients, permettant d'estimer qualitativement et quantitativement la crédibilité de chaque donnée saisie.

Enfin, pour que CAPTAIN MEMO soit **tolérante à la saisie des intervalles temporels imprécis**, nous proposons deux approches : l'une basée sur un environnement précis et l'autre basée sur un environnement flou. Dans chacune des deux approches, nous étendons l'approche 4D-fluents pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations

temporelles qualitatives, puis nous étendons l’algèbre d’Allen pour prendre en compte les intervalles imprécis dans le cadre de notre ontologie MemoFuzzyOnto.

Nos contributions sont **implémentées et évaluées**. Nous avons évalué l’accessibilité de ses interfaces utilisateurs, le service de CAPTAIN MEMO qui a pour but de stimuler la mémoire du patient, notre approche pour l’estimation quantitative de la crédibilité des données saisies ainsi que la visualisation du graphe générée à l’aide de Memo Graph. Nous avons également évalué la performance de Memo Graph et son utilisabilité par des experts du domaine.

Mots-clés : Alzheimer, Prothèse de mémoire, Accessibilité, Interface utilisateur, Ontologie, Web sémantique, Visualisation de l’ontologie, Imperfection des données, Crédibilité des données, Intervalle de temps imprécis.

Abstract

In the context of this thesis, we propose a “**smart**” **memory prosthesis**, called CAPTAIN MEMO, **to help Alzheimer’s disease patients to palliate mnesic problems**. It is based on a **temporal, fuzzy and multilingual ontology** named MemoFuzzyOnto.

It provides **accessible user interfaces to this demographic**. To design these interfaces, we propose a methodology named InterfaceToAlz which serves as an information base for guiding and evaluating the design of user interfaces for Alzheimer’s disease patients. It identifies 145 design guidelines.

Besides, we propose **an ontology visualization tool** called Memo Graph which offers an accessible and understandable visualization to Alzheimer’s disease patients. In fact, in the context of CAPTAIN MEMO, there is a need to generate the patient entourage/family tree from its personal data structured according to MemoFuzzyOnto. Memo Graph is based on our design guidelines and our approach, named Incremental Key-Instances Extraction and Visualisation, to extract and visualize descriptive instance summarizations from a given ontology and generate “summary instance graphs” from the most important data. It supports Linked Data visualization and scaling.

Furthermore, we propose **a typology of the imperfection of the data entered** (mainly due to the memory discordance caused by this disease), and a **methodology to allow false data entry**. We propose a believability model and an approach called Data Believability Estimation for Applications to Alzheimer Patients to estimate qualitatively and quantitatively the believability of each data entered.

Finally, CAPTAIN MEMO allows **imprecise time intervals entry**. We propose two approaches: a crisp-based approach and a fuzzy-based approach. The first one uses only crisp standards and tools and is modeled in OWL 2. The second approach is based on fuzzy sets theory and fuzzy tools and is modeled in Fuzzy-OWL 2. For the two approaches, we extend the 4D-fluents model to represent imprecise time intervals and qualitative interval relations. Then, we extend the Allen’s interval algebra to compare imprecise time interval in the context of MemoFuzzyOnto.

Our contributions are **implemented and evaluated**. We evaluated the service of CAPTAIN MEMO which has the aim to stimulate the patient’s memory, the accessibility of its

user interfaces, the efficiency of our approach to estimate quantitatively the believability of each data entered and the visualization generated with Memo Graph. We also evaluated Memo Graph with domain expert users.

Keywords: Alzheimer, Memory prosthesis, Accessibility, User interface, Ontology, Semantic Web, Ontology visualization, Data imperfection, Data believability, Imprecise time interval.

Table des matières

Liste des tableaux	16
Liste des figures	18
Liste des algorithmes	22
CHAPITRE 1: Introduction générale.....	23
1.1. Contexte du travail.....	24
1.1.1. Projet VIVA	24
1.1.2. Élaboration d'une prothèse de mémoire - CAPTAIN MEMO - pour les malades d'Alzheimer.....	24
1.2. Problématiques associées à l'élaboration d'une prothèse de mémoire.....	25
1.3. Contributions	28
1.4. Liste des publications.....	32
1.5. Organisation du mémoire	34
CHAPITRE 2: Accessibilité des interfaces utilisateurs aux malades d'Alzheimer	35
2.1. Introduction	36
2.2. État de l'art	37
2.2.1. Maladie d'Alzheimer	37
2.2.1.1. Définition de la démence	37
2.2.1.2. Définition de la maladie d'Alzheimer	38
2.2.1.3. Prévalence et incidence de la maladie d'Alzheimer	38
2.2.1.4. Évolution de la maladie d'Alzheimer	39
2.2.1.5. Prise en charge de la maladie d'Alzheimer.....	40
2.2.2. Concept de l'utilisabilité	42
2.2.3. Vers une conception anthropocentrée : la conception centrée utilisateur.....	43
2.2.4. Méthodes d'aide à la conception et à l'évaluation de l'utilisabilité	44
2.2.4.1. Analyse heuristique.....	45
2.2.4.2. Interview	45
2.2.4.3. Test utilisateur	45

2.2.4.4. Questionnaire.....	46
2.2.4.4.1. Définition	46
2.2.4.4.2. Questionnaire System Usability Scale	47
2.3. Notre méthodologie InterfaceToAlz pour la conception d’interfaces utilisateurs accessibles aux malades d’Alzheimer	48
2.4. Notre guide de bonnes pratiques d’ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d’Alzheimer	50
2.4.1. Caractéristiques des malades d’Alzheimer	50
2.4.1.1. Incapacités liées à la maladie d’Alzheimer	50
2.4.1.2. Incapacités liées au processus normal du vieillissement	52
2.4.2. Sélection des travaux	54
2.4.2.1. Accessibilité aux personnes porteuses de handicap.....	55
2.4.2.2. Accessibilité aux personnes âgées	56
2.4.2.3. Accessibilité aux personnes atteintes de démence	58
2.4.2.4. Accessibilité aux personnes dyslexiques	58
2.4.2.5. Accessibilité aux personnes aphasiques.....	58
2.4.3. Bonnes pratiques d’ergonomie	59
2.5. Conclusion.....	67
CHAPITRE 3: Memo Graph : Visualisation d’ontologies accessible aux malades d’Alzheimer	69
3.1. Introduction	70
3.2. État de l’art	71
3.2.1. Notion de l’ontologie	71
3.2.1.1. Web sémantique	71
3.2.1.2. Définition	73
3.2.1.3. Composants	74
3.2.2. Outils de visualisation d’ontologies.....	75
3.2.3. Outils de visualisation des données liées	85
3.3. Présentation de notre outil de visualisation d’ontologies Memo Graph	89
3.3.1. Une visualisation à base de graphe	89
3.3.2. Accessibilité de la visualisation générée.....	89

3.3.3.	Lisibilité et compréhensibilité de la visualisation générée : notre approche IKIEV	91
3.3.3.1.	Mesures déterminant les instances-clés	92
3.3.3.1.1.	Property Centrality	93
3.3.3.1.2.	Class Centrality	94
3.3.3.1.3.	Hits Centrality	94
3.3.3.1.4.	Instance Importance	95
3.3.3.2.	Algorithme général	95
3.3.4.	Implémentation	96
3.3.5.	Quelques utilisations	97
3.3.5.1.	Visualisation de l'ontologie à petite échelle FOAF	97
3.3.5.2.	Visualisation du jeu de données ouvertes liées à large échelle DBpedia	98
3.4.	Évaluation de Memo Graph avec des experts du domaine	98
3.4.1.	Évaluation de la performance	99
3.4.1.1.	Étude quantitative	99
3.4.1.2.	Étude qualitative	103
3.4.1.3.	Pensée à voix haute	104
3.4.2.	Évaluation de l'utilisabilité	105
3.5.	Conclusion	106
CHAPITRE 4: Qualité des données saisies dans CAPTAIN MEMO : les différents types d'imperfection		107
4.1.	Introduction	108
4.2.	État de l'art	109
4.2.1.	Imperfection des données	109
4.2.1.1.	Typologies de l'imperfection des données	109
4.2.1.1.1.	Typologies génériques de l'imperfection des données	109
4.2.1.1.2.	Typologies spécifiques de l'imperfection des données dans un domaine donné	112
4.2.1.1.3.	Discussion	114
4.2.1.2.	Représentations formelles des données imparfaites	115
4.2.2.	Qualité des données	115
4.2.2.1.	Définition	116

4.2.2.2.	Dimensions de la qualité	116
4.2.2.3.	Importance de la gestion de la qualité des données	118
4.2.2.4.	Méthodologies pour l'évaluation et l'amélioration de la qualité de données	119
4.3.	Échantillon de données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO	120
4.3.1.	Présentation de l'exemple motivant	120
4.3.2.	Analyse : dégager les différents types d'imperfection	122
4.4.	Notre typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO	124
4.4.1.	Types d'imperfection directs	127
4.4.2.	Types d'imperfection indirects	129
4.5.	Notre méthodologie générale de l'estimation et l'amélioration de la qualité des données	130
4.6.	Conclusion	131
CHAPITRE 5: Prise en compte de la discordance mnésique : estimation de la crédibilité des données saisies dans CAPTAIN MEMO		133
5.1.	Introduction	134
5.2.	État de l'art	135
5.2.1.	Crédibilité des données	135
5.2.1.1.	Définition	135
5.2.1.2.	Évaluation	136
5.2.2.	Théorie des ensembles flous	137
5.2.2.1.	Principe et concepts de base	137
5.2.2.2.	Ensemble flou	137
5.2.2.3.	Fonction d'appartenance	138
5.2.2.4.	Variable linguistique	139
5.2.2.5.	Opérateurs flous	140
5.2.2.6.	Systèmes d'inférence floue : le raisonnement flou	140
5.2.3.	Réseaux bayésiens : le raisonnement dans l'incertain	144
5.2.3.1.	Prérequis	144
5.2.3.2.	Définition d'un réseau bayésien	145
5.3.	Estimation qualitative de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO : notre modèle de crédibilité	147

5.3.1.	« Caractère raisonnable de la donnée ».....	148
5.3.2.	« Fiabilité de l’auteur »	149
5.3.2.1.	« Fiabilité du malade d’Alzheimer »	150
5.3.2.2.	« Fiabilité d’un utilisateur membre de l’entourage du malade d’Alzheimer »	150
5.4.	Estimation quantitative de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO : notre approche DBE_ALZ	151
5.4.1.	Modules	153
5.4.1.1.	« Estimation du caractère raisonnable de la donnée »	153
5.4.1.1.1.	« Correspondance avec le patron de la donnée saisie »	153
5.4.1.1.2.	« Génération du patron de la règle de vérification »	153
5.4.1.1.3.	« Accomplissement de la règle de vérification ».....	155
5.4.1.2.	« Estimation de la fiabilité de l’auteur ».....	157
5.4.1.2.1.	« Estimation de la fiabilité du malade d’Alzheimer »	158
5.4.1.2.2.	« Estimation de la fiabilité d’un auteur de l’entourage du malade d’Alzheimer »	160
5.4.1.3.	« Estimation de la crédibilité de la donnée »	162
5.4.2.	Algorithme général	164
5.4.3.	Mise en œuvre	165
5.5.	Conclusion.....	166
CHAPITRE 6: Prise en compte de l’imprécision dans les dates et les intervalles de temps : représentation et raisonnement.....		169
6.1.	Introduction	170
6.2.	État de l’art	171
6.2.1.	Formalismes temporels qualitatifs	171
6.2.1.1.	Algèbre des intervalles d’Allen	171
6.2.1.2.	Algèbre des points de Vilain et Kautz	173
6.2.2.	Modélisation de la dimension temporelle dans l’ontologie	174
6.2.3.	Extensions de l’algèbre d’Allen	176
6.2.4.	Notion d’ontologie floue	177
6.2.4.1.	Définition	177
6.2.4.2.	Composants	178

6.2.4.3.	Langages de description.....	180
6.2.4.4.	Raisonnement flou	181
6.2.4.5.	Méthodes de construction	183
6.3.	Approche 1 : notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue précise.....	185
6.3.1.	Notre extension de l’approche 4D-fluents	186
6.3.2.	Notre extension de l’algèbre d’Allen.....	188
6.4.	Approche 2 : notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue.....	189
6.4.1.	Notre extension de l’approche 4D-fluents	190
6.4.2.	Raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue, graduelle et personnalisée.....	192
6.4.2.1.	Notre extension de l’algèbre de Vilain et Kautz	192
6.4.2.1.1.	Notre généralisation du comparateur “Follows”	193
6.4.2.1.2.	Notre généralisation du comparateur “Precede”	195
6.4.2.1.3.	Notre généralisation du comparateur “Same”	197
6.4.2.2.	Notre extension de l’algèbre d’Allen.....	198
6.5.	Conclusion.....	200
CHAPITRE 7: Prototypage de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO		203
7.1.	Introduction	204
7.2.	État de l’art sur les aide-mémoires	205
7.2.1.	Aides à la planification	205
7.2.2.	Stimulateurs de mémoire.....	207
7.2.3.	Discussion	208
7.3.	Présentation de notre prototype de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO.....	209
7.3.1.	Architecture	211
7.3.2.	Services offerts	212
7.3.2.1.	Family/Entourage Show.....	212
7.3.2.2.	Autobiographical Training.....	213
7.3.2.3.	E-Diary.....	217
7.3.2.4.	MEMO_Calendring	218
7.3.3.	Notre ontologie MemoFuzzyOnto.....	221

7.3.3.1.	Méthode de construction.....	222
7.3.3.2.	Choix de l'ontologie PersonLink.....	222
7.3.3.3.	Extension de l'ontologie PersonLink.....	223
7.3.3.4.	Temporalité	224
7.3.4.	Conception des interfaces utilisateurs.....	225
7.3.5.	Intégration du prototype de notre approche DBE_ALZ	229
7.4.	Évaluations dans le cadre de CAPTAIN MEMO	230
7.4.1.	Évaluation de l'accessibilité de CAPTAIN MEMO et Memo Graph.....	230
7.4.2.	Évaluation de l'efficacité du service Autobiographical Training	232
7.4.3.	Évaluation de l'efficacité de notre approche DBE_ALZ.....	234
7.5.	Conclusion.....	235
CHAPITRE 8: Conclusion et perspectives		239
8.1.	Contributions	240
8.1.1.	Sur le plan théorique	240
8.1.2.	Sur le plan pratique	242
8.2.	Perspectives	243
8.2.1.	Sur le plan théorique	243
8.2.2.	Sur le plan pratique	244
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		247

Liste des tableaux

Tableau 1. Notre sélection de travaux présentant un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie.	55
Tableau 2. Notre guide de 145 bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs pour les malades d'Alzheimer.	59
Tableau 3. Comparaison des outils de visualisation d'ontologies.	79
Tableau 4. Outils de visualisation des données liées.....	86
Tableau 5. Résultats de l'étude quantitative de l'évaluation de la performance de Memo Graph avec des experts du domaine.....	101
Tableau 6. Résultats de l'étude qualitative de l'évaluation de la performance de Memo Graph avec des experts du domaine.....	103
Tableau 7. Résultats du questionnaire SUS pour l'évaluation de l'utilisabilité de Memo Graph avec des experts du domaine.....	105
Tableau 8. Modèles qualité.	117
Tableau 9. Opérateurs flous « de Zadeh ».	140
Tableau 10. Patrons du réseau bayésien associé aux patrons d'assertion.	156
Tableau 11. Matrice de décision du système d'inférence floue du module « estimation de la fiabilité du malade d'Alzheimer ».	160
Tableau 12. Matrice de décision du système d'inférence floue du module « estimation de la fiabilité d'un auteur de l'entourage du malade d'Alzheimer ».	162
Tableau 13. Matrice de décision du système d'inférence floue du module « estimation de la crédibilité de la donnée ».	164
Tableau 14. Algèbre des intervalles d'Allen.....	172
Tableau 15. Algèbre des points de Vilain et Kautz.....	173
Tableau 16. Modélisation de la dimension temporelle dans l'ontologie.	175
Tableau 17. Langages de description de l'ontologie floue.	180
Tableau 18. Raisonneurs flous.	182
Tableau 19. Méthodes de construction de l'ontologie floue.....	184
Tableau 20. Notre extension de l'algèbre d'Allen avec une vue précise.	189
Tableau 21. Signification des comparateurs temporels $\{\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$	193

Tableau 22. Signification des comparateurs temporels $\{\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$	195
Tableau 23. Signification des relations temporelles $\{\text{Before}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I, J), \dots, \text{Before}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)\}$	198
Tableau 24. Notre extension de l’algèbre d’Allen avec une vue floue, graduelle et personnalisée.	199
Tableau 25. Aides à la planification.	206
Tableau 26. Stimulateurs de mémoire (jeux de type « question-réponse »).....	207
Tableau 27. Résultats du questionnaire pour l’évaluation de l’accessibilité des interfaces utilisateurs du prototype de CAPTAIN MEMO et de la visualisation générée à l’aide de Memo Graph avec des malades d’Alzheimer.	231
Tableau 28. Évolution des moyennes hebdomadaires du “Successful Score”.	232
Tableau 29. Mesures de la Précision et du Rappel associées aux données personnelles des patients.	235

Liste des figures

Figure 1. Étapes du processus de la conception centrée utilisateur selon la norme ISO 9241-210.	44
Figure 2. Notre méthodologie de conception InterfaceToAlz.	49
Figure 3. Incapacités liées à la maladie d’Alzheimer et au processus normal du vieillissement.	50
Figure 4. Représentation pyramidale du web sémantique [Berners-Lee et al., 2001].....	72
Figure 5. Notre approche IKIEV.....	92
Figure 6. Architecture de Memo Graph.....	97
Figure 7. Graphe généré à partir de l’ontologie FOAF à l’aide de Memo Graph.	97
Figure 8. Graphe généré à l’aide de Memo Graph à partir des 30 instances-clés de la classe « sport ».	98
Figure 9. Graphe généré à partir de l’ontologie FOAF à l’aide de RDF Gravity.	100
Figure 10. Graphe généré à partir de l’ontologie FOAF à l’aide de WebVOWL.	101
Figure 11. Typologie de la non-précision des données selon [Niskanen, 1989].....	110
Figure 12. Typologie de l’imperfection des données selon [Bouchon-Meunier, 1995].....	110
Figure 13. Typologie de l’incertitude des données selon [Klir et Yuan, 1995].	111
Figure 14. Typologie de l’imperfection des données selon [Smets, 1997].....	111
Figure 15. Typologie de l’incertitude des données géographiques selon [Fisher et al., 2005].	112
Figure 16. Typologie de l’imperfection d’un ensemble de données textuelles décrivant des objets ethnographiques selon [Olteanu et al., 2006].....	113
Figure 17. Typologie de l’imperfection des données financières selon [Casta, 2009].....	113
Figure 18. Typologie de l’imperfection des données archéologiques selon [Desjardin et al., 2012].....	114
Figure 19. Modèle qualité de [Wang et Strong, 1996].	118
Figure 20. Méthodologie TDQM pour l’amélioration continue de la qualité des données [Wang et Strong, 1996].....	120
Figure 21. Échantillon fictif de données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.	121
Figure 22. Notre typologie de l’imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.	126

Figure 23. Estimation qualitative et quantitative de la crédibilité des données saisies dans CAPTAIN MEMO.....	134
Figure 24. Fonction caractéristique de l'ensemble des personnes de « taille moyenne ».	138
Figure 25. Fonction d'appartenance de l'ensemble flou des personnes de « taille moyenne ».	138
Figure 26. Fonctions d'appartenance proposées par [Zadeh, 1975].....	139
Figure 27. Système d'inférence floue.	142
Figure 28. Fonctions d'appartenance des variables Pression, Température et Ouverture vanne.	142
Figure 29. Activation des règles floues.	143
Figure 30. Agrégation MAXIMUM.	144
Figure 31. Graphe bayésien causal.	146
Figure 32. Exemple d'un réseau bayésien.	147
Figure 33. Notre modèle de crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.	148
Figure 34. Notre approche DBE_ALZ.	152
Figure 35. Patron du réseau bayésien associé au patron de la règle de vérification.....	156
Figure 36. Exemple d'un patron d'un réseau bayésien.....	157
Figure 37. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_MMSE ».....	159
Figure 38. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_Etat_Moment ».	159
Figure 39. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Fiabilité_Malade_Alzheimer ».....	159
Figure 40. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_Champs_Connaissances ».	161
Figure 41. Fonction d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_Fiabilité_Age ».	161
Figure 42. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Fiabilité_Entourage_Alzheimer ».	162
Figure 43. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Caractère_Raisonnable ».	163
Figure 44. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Fiabilité_Auteur ».....	163

Figure 45. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Crédibilité_Donnée ».....	163
Figure 46. Exemple montrant le manque de gradualité de l'algèbre d'Allen.	173
Figure 47 . Exemple montrant le manque de robustesse de l'algèbre d'Allen.	173
Figure 48. Fonctions d'appartenance des concepts flous relatifs au concept précis « Patient » [Zekri et al., 2015].	178
Figure 49. Exemple de relations conceptuelles floues [Ghorbel H. et al., 2013].	179
Figure 50. Une instanciation de l'approche 4D-fluents classique.	186
Figure 51. Notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie précise.	187
Figure 52. Une instanciation de notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie précise.....	188
Figure 53. Notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie floue. .	191
Figure 54. Une instanciation de notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie floue.	192
Figure 55. Fonctions d'appartenance associées aux comparateurs $\{Follow_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots Follow_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$	194
Figure 56. Fonctions d'appartenance associées aux comparateurs $\{Precede_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots Precede_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$	196
Figure 57. Fonction d'appartenance associée au comparateur $Same^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	197
Figure 58. Critères déterminant l'intelligence de CAPTAIN MEMO.....	211
Figure 59. Architecture du prototype de CAPTAIN MEMO.....	212
Figure 60. Un graphe familial généré à l'aide de Memo Graph.	213
Figure 61. Exemple de question générée au patient d'Alzheimer.....	214
Figure 62. Feedback associé à la réponse de la question affichée dans la Figure 61.....	215
Figure 63. Une question générée au patient d'Alzheimer en langue arabe.	216
Figure 64. Interface utilisateur permettant l'édition d'E-Diary.	218
Figure 65. Interface utilisateur permettant l'édition des événements planifiés.	219
Figure 66. Interface utilisateur de notification associée à l'événement planifié présenté dans la Figure 65.	219
Figure 67. Génération des données supplémentaires avec MEMO_Calendring.....	220
Figure 68. Reconnaissance des entités temporelles floues.	221
Figure 69. Méthode de construction de notre ontologie MemoFuzzyOnto.....	222
Figure 70. Diagramme de classes de l'ontologie PersonLink [Herradi 2015].....	223

Figure 71. Une instanciation montrant la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de notre ontologie MemoFuzzyOnto.	225
Figure 72. Utilisation de la métaphore de la clé associée à l’interface utilisateur d’inscription.	227
Figure 73. Interface utilisateur permettant d’ajuster la taille du texte.	228
Figure 74. Saisie des données en utilisant les listes déroulantes.	229

Liste des algorithmes

Algorithme 1. Notre approche IKIEV.....	96
Algorithme 2. Notre méthodologie générale de l'estimation et l'amélioration de la qualité des données.	131
Algorithme 3. Notre approche DBE_ALZ.	165
Algorithme 4. Algorithme $ALQ_{2/2}$ associé à la question $Q_{2/2}$	216
Algorithme 5. Autobiographical Training.....	217

CHAPITRE 1 :

Introduction générale

Dans cette introduction générale, nous présentons le contexte de nos travaux de thèse, les problématiques associées, nos contributions, nos publications ainsi que l'organisation de ce manuscrit.

1.1. Contexte du travail

1.1.1. Projet VIVA

Notre travail de thèse se situe dans la suite du **projet VIVA**¹ (« **Vivre à Paris avec Alzheimer en 2030 grâce aux nouvelles technologies** »). Le projet VIVA vise d'une part à explorer et à comprendre les problèmes que rencontrent quotidiennement à Paris les personnes âgées souffrant de dégénérescence de mémoire – plus particulièrement les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer – et d'autre part à proposer pour chacun de ces problèmes un ensemble de solutions fondées sur les dernières avancées en matière de technologies informatiques.

Jusqu'à présent les technologies d'assistance sont principalement destinées aux patients à un stade avancé (par exemple : pour détecter une chute ou une fugue). Le projet VIVA s'adresse également à des **patients aux premiers stades de la dégénérescence de mémoire**.

L'objectif final du projet VIVA est de définir une **prothèse (ou orthèse) de mémoire qui est le but ultime de notre travail de thèse**.

1.1.2. Élaboration d'une prothèse de mémoire - CAPTAIN MEMO - pour les malades d'Alzheimer

Nous proposons d'élaborer une **prothèse de mémoire** - appelée CAPTAIN MEMO - pour **aider les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer à pallier les problèmes mnésiques**. Elle est proposée pour être utilisée dès le **stade très précoce de la maladie**. L'idée est que le patient au premier stade peut agir et être véritablement actif en stockant dans sa base de connaissances des données qu'il va inexorablement perdre. Au fur et à mesure que la maladie progresse, la prothèse lui restitue ses données via un ensemble de services :

- **Le service Family/Entourage Show** : ce service permet au patient d'Alzheimer de se rappeler des membres de sa famille et de son entourage, via l'affichage d'un graphe et d'informations sur les personnes. Le patient peut alors retrouver une personne soit

¹ <http://viva.cnam.fr/>

en effectuant un simple parcours visuel du graphe, soit en spécifiant des critères concernant la personne ou des événements vécus avec elle, etc. L'objectif est d'aider le patient, dans un but de socialisation, à se souvenir de son entourage.

- **Le service Autobiographical Training** : il propose un jeu de type « question-réponse » qui a pour but la stimulation de la mémoire du patient.
- **Le service E-Diary** : il permet au malade d'Alzheimer de raconter les principaux événements de sa journée : ses pensées, ses problèmes de santé, les symptômes ressentis, les personnes rencontrées, ses coups de téléphone passés, ses émotions, etc.
- **Le service MEMO_Calendring** : il propose un aide à la planification. Il aide le malade à organiser les activités de la vie quotidienne : rendez-vous, prise de médicaments, factures d'électricité à payer, feuille d'impôts à remplir, liste des courses, récupérer ses vêtements au pressing, etc.

1.2. Problématiques associées à l'élaboration d'une prothèse de mémoire

L'état de l'art montre que les aide-mémoires existants pour les malades d'Alzheimer ou les personnes souffrant de perte mnésique ne sont qu'en **tout début de la recherche** :

- Ils offrent des **interfaces utilisateurs généralement non accessibles** à l'utilisateur cible (pas de prise en compte des défaillances sensorielles et intellectuelles), et ne s'adaptent pas aux stades successifs de la maladie.
- Ils **ne prennent pas en compte la discordance mnésique et ne traitent pas l'imperfection des données saisies** (par exemple : pas de détection d'incohérences, pas de détection des données fausses, etc.).
- Ils **ne supportent pas les données imprécises**, qui sont pourtant le propre de la mémoire humaine, typiquement en ce qui concerne les données temporelles.
- Leurs **systèmes de stockage ne sont pas « sémantiques »** (pas de liens entre les données stockées, pas d'apport de données par déduction, absence d'une recherche assistée et intégrant véritablement la « sémantique », etc.).
- Ils **ne supportent pas les entrées en langage naturel** (saisie et interrogation).
- Ils **ne supportent pas le multilinguisme et le multiculturalisme**. Nous notons en particulier qu'il n'existe pas un aide-mémoire développé en langue arabe et

respectant la culture arabe (par exemple : les liens familiaux proposés sont généralement ceux de la culture américaine).

- Ils sont principalement destinés aux **patients à un stade avancé**.

Par rapport aux travaux connexes, CAPTAIN MEMO vise à offrir des **interfaces utilisateurs « intelligentes » fondées sur un traitement sémantique des données, et qui s'adaptent au patient**. Plusieurs problématiques sont identifiées :

A. Accessibilité des interfaces utilisateurs aux malades d'Alzheimer

CAPTAIN MEMO est conçue pour être utilisée par des malades d'Alzheimer. Cependant, les incapacités liées à cette maladie et au processus normal du vieillissement les empêchent d'utiliser des interfaces utilisateurs standards [Friedman et Bryen, 2012] [Ancient et Good, 2013]. Selon [De Boer, 2008], la difficulté d'utilisation de ces dernières est l'une des raisons qui empêche les malades d'Alzheimer d'utiliser les technologies numériques. Les interfaces utilisateurs doivent tenir compte de leurs incapacités [Hunter et al., 2007] [De Boer, 2008] [Ancient et Good, 2013] afin d'être accessibles et faciles à utiliser.

À notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature une méthodologie de conception et un guide complet de bonnes pratiques d'ergonomie que nous pourrions suivre pour concevoir les interfaces utilisateurs de CAPTAIN MEMO et garantir l'accessibilité.

B. Une visualisation de l'ontologie accessible aux malades d'Alzheimer

Dans le cadre de CAPTAIN MEMO, nous avons besoin de générer un graphe de la famille et de l'entourage du patient d'Alzheimer à partir de sa base de connaissances. Cette dernière est structurée selon une ontologie. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer dans CAPTAIN MEMO un outil de visualisation d'ontologies qui génère un graphe, ayant la particularité d'être accessible aux malades d'Alzheimer.

L'état de l'art montre que les outils de visualisation d'ontologies existants ne prennent pas en compte les problèmes liés à l'accessibilité. À notre connaissance, il n'existe pas un outil qui offre une visualisation d'ontologies accessible aux non-connaisseurs du domaine et souffrant de la maladie d'Alzheimer.

De plus, afin d'offrir une visualisation compréhensible par malade d'Alzheimer, nous voudrions visualiser seulement le résumé des données pour alléger le graphe résultant tout en gardant les éléments les plus importants. Dans la littérature, il existe des travaux qui traitent le

résumé de l'ontologie. Cependant, à notre connaissance, ces travaux se focalisent seulement sur le résumé du TBox de l'ontologie (terminologie) et non de l'ABox (assertions, instances).

C. Imperfection des données saisies

Dans le cadre de CAPTAIN MEMO, les données saisies par le patient d'Alzheimer et/ou son entourage sont imparfaites. D'une part, à cause des déclinis relatifs à la maladie d'Alzheimer et au processus normal du vieillissement, les données saisies par le propriétaire de la prothèse sont sujettes à différentes formes d'imperfection. Par exemple, il peut saisir des données contradictoires ou redondantes à cause de sa discordance mnésique. Les données saisies par un utilisateur de l'entourage du patient d'Alzheimer sont également imparfaites. Par exemple, il ne connaît pas nécessairement toutes les données relatives au propriétaire de la prothèse (l'incomplétude de données).

Pour la prise en compte de l'imperfection des données saisies, la compréhension de ses différentes formes est fondamentale. L'état de l'art montre que les différentes typologies de l'imperfection des données dépendent du domaine et qu'il n'existe pas une typologie standard. Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature une typologie fine de l'imperfection des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer.

D. Qualité des données saisies

Comme déjà mentionné, les données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO sont imparfaites. Notre prothèse de mémoire utilise les données saisies et inférées (l'inférence à partir de données imparfaites donne naissance à d'autres données imparfaites) pour générer un ensemble de services. Cependant, l'imperfection de ces données affecte leurs qualités, et par la suite la qualité des services offerts. Prenons l'exemple du service qui génère le graphe de la famille et de l'entourage. Si l'utilisateur saisit des données fausses relatives aux membres de sa famille et des différents liens familiaux qui les relie, l'arbre généalogique généré ne correspond pas en conséquence à la réalité.

E. Incertitude des données saisies

Dans le cadre de CAPTAIN MEMO, les données saisies par le propriétaire de la prothèse et/ou son entourage sont incertaines (une partie de ces données est fausse). Il est difficile d'être certain d'une donnée, mais les malades d'Alzheimer sont particulièrement peu fiables ; et leur fiabilité fluctue d'un moment à l'autre. En conséquence, nous proposons d'estimer la crédibilité de chaque donnée saisie. À notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature

une approche permettant l'estimation qualitative et quantitative de la crédibilité des données saisies dans le contexte des applications pour les malades d'Alzheimer.

F. Imprécision des données temporelles saisies

Nous remarquons lors des évaluations effectuées dans le cadre de CAPTAIN MEMO que la plupart du temps le patient exprime les données temporelles d'une façon imprécise (par exemple : « vers les années 60 », « après la naissance de ma fille », etc.). Le système de stockage de notre prothèse de mémoire étant fondé sur une ontologie, nous devons représenter et raisonner sur ces données temporelles imprécises dans le cadre de cette dernière.

L'état de l'art montre beaucoup de travaux sur la modélisation et le raisonnement sur les données temporelles d'une ontologie OWL. Cependant, à notre connaissance, ces travaux se focalisent seulement sur des données temporelles précises. Aucun de ces travaux ne considère le caractère imprécis des données temporelles.

1.3. Contributions

Dans cette section, nous présentons nos contributions.

A. Conception des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer

- Une **méthodologie de conception**, appelée InterfaceToAlz, qui définit un ensemble d'étapes à suivre par le designer pour concevoir des interfaces utilisateurs pour les malades d'Alzheimer.
- Un **guide de 145 bonnes pratiques** d'ergonomie que les concepteurs pourront suivre pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer. Ces dernières sont catégorisées selon les incapacités relatives à cet utilisateur particulier et un ensemble de critères d'ergonomie.

Notre méthodologie de conception InterfaceToAlz et notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie font l'objet de l'article de conférence [Ghorbel et al., 2017b].

B. Outil de visualisation d'ontologies Memo Graph

- Une approche, appelée **Incremental Key-Instances Extraction and Visualisation (IKIEV)**, qui permet une **extraction et une visualisation incrémentale du résumé de l'ABox de l'ontologie**.

- Un **outil de visualisation d'ontologies**, nommé Memo Graph, qui génère une visualisation **accessible aux malades d'Alzheimer**. Il fait appel à notre **guide de bonnes pratiques d'ergonomie** pour garantir l'accessibilité de la visualisation générée. Pour assurer sa lisibilité et la compréhensibilité, nous nous basons sur notre **approche IKIEV**. Memo Graph supporte aussi la **visualisation des données ouvertes liées du web de données** (Linked Data). Il peut être intégré dans d'autres applications pour les non-connaisseurs du domaine et utilisé en tant qu'application autonome par des experts du domaine. Il supporte aussi le **passage à l'échelle**.

Les contributions citées sont l'objet de notre article de revue [Ghorbel et al., 2016a] et de nos articles de conférence [Ghorbel et al., 2016b] et [Ghorbel et al., 2017a]. L'outil Memo Graph intervient dans les publications de [Herradi et al., 2015a] et [Herradi et al., 2015b] pour la mise en œuvre de l'ontologie PersonLink.

C. Prise en compte de la discordance mnésique dans CAPTAIN MEMO

- Une **typologie de l'imperfection des données saisies** par le malade d'Alzheimer ou une personne de son entourage.

D. Estimation qualitative et quantitative de la crédibilité des données saisies dans CAPTAIN MEMO

- Un **modèle d'évaluation de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO**. Il propose des dimensions permettant d'estimer **qualitativement** la crédibilité de ces données. Il peut être généralisable à d'autres applications dont les données sont entrées par des utilisateurs ayant des troubles de mémoire.
- Une approche, nommée **Data Believability Estimation for Applications to Alzheimer Patients (DBE_ALZ)**, pour **estimer quantitativement la crédibilité des données saisies**. Elle se fonde sur notre modèle d'évaluation de la crédibilité. Elle est basée sur la théorie des ensembles flous (systèmes d'inférences flous) et la théorie des probabilités (réseaux bayésiens). Elle peut être généralisable à d'autres applications pour les malades d'Alzheimer.

E. Représentation et raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le contexte de l'ontologie

- Une **approche « précise » qui permet la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis**. (1) Nous étendons l'approche **4D-fluents** [Welty

et Fikes, 2006] pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations temporelles qualitatives précises entre ces derniers dans le cadre d'une **ontologie précise**. (2) Nous étendons l'algèbre des intervalles d'Allen [Allen, 1983] pour comparer deux intervalles temporels imprécis avec **une vue précise**. Les relations résultantes sont précises. (3) Nous inférons, via un ensemble de **règles SWRL**, notre extension de l'algèbre d'Allen dans le cadre d'une ontologie **OWL 2**.

- **Une approche « floue » qui permet la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis.** (1) Nous étendons l'approche **4D-fluents** pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations temporelles qualitatives imprécises qui peuvent exister entre eux dans le contexte d'une **ontologie floue**. (2) Nous étendons l'algèbre d'Allen avec **une vue floue, graduelle et personnalisée** pour raisonner sur les intervalles temporels imprécis. (3) Nous déduisons les relations résultantes dans le contexte d'une ontologie floue formalisée en **Fuzzy-OWL 2** en utilisant un ensemble de **règles IF-THEN de Mamdani**.

Ces approches font l'objet de nos articles [Ghorbel et al., 2018] et [Métais et al., 2018].

F. Ontologie MemoFuzzyOnto

- Pour assurer le traitement sémantique des données, nous structurons les données personnelles du propriétaire de la prothèse de mémoire selon une **ontologie appelée MemoFuzzyOnto. Elle est temporelle, floue, multilingue et multiculturelle**. Elle est basée sur l'ontologie PersonLink [Herradi et al., 2015a] qui permet de modéliser, stocker et raisonner sur les liens familiaux. Nous étendons cette dernière pour représenter toutes les données manipulées dans le cadre de CAPTAIN MEMO (liens conviviaux, données extraites à partir de Facebook, etc.). Cette ontologie implémente notre approche « floue » permettant la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis et le travail de [Herradi et al., 2017] pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels précis.
- **Moteur d'inférence** : nous associons un ensemble de règles SWRL et un ensemble de règles IF-THEN de Mamdani pour inférer de nouvelles données à partir de celles initialement saisies.

G. Prototypage de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO

- **Implémentation du service Family/Entourage Show** : nous intégrons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph dans CAPTAIN MEMO pour générer le graphe de la famille et de l'entourage du patient.

- **Implémentation du service Autobiographical Training** : par rapport aux travaux concurrents, ce service offre des **interfaces utilisateurs adaptatives** (qui s'ajustent automatiquement selon le profil du malade d'Alzheimer). Et surtout les questions générées sont basées sur les données initialement saisies et inférées (la vie privée du malade). Ce jeu ajuste automatiquement le niveau de difficulté des questions en fonction de la progression de la maladie d'Alzheimer.
- **Implémentation du service E-Diary** : ce service **génère des données supplémentaires** sur les événements enregistrés en se basant sur les données saisies et inférées qui sont stockées dans la base de connaissances du malade et le jeu de données ouvertes liées DBpedia² (un traitement sémantique des données). Par exemple, le patient saisit qu'il visitera Pierre l'après-midi. Ce service affiche que Pierre est son cousin, et il affiche sa photo et son adresse.
- **Implémentation du service MEMO_Calendring** : par rapport aux travaux connexes, ce service **génère automatiquement des données supplémentaires** sur les événements planifiés (par exemple : l'affichage de l'adresse d'un endroit où le malade doit y aller) et il **supporte des entrées en langage naturel**. MEMO_Calendring fait l'objet de l'article de conférence [Ghorbel et al., 2017c].
- **La conception et l'implémentation des interfaces utilisateurs** du prototype de CAPTAIN MEMO en se basant sur notre méthodologie de conception InterfaceToAlz et notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie proposé. La conception et l'évaluation de ces interfaces utilisateurs font l'objet de l'article de conférence [Ghorbel et al., 2016c].
- **L'intégration du prototype de notre approche DBE_ALZ** dans le prototype de CAPTAIN MEMO pour estimer quantitativement la crédibilité des données saisies.

H. Évaluations et validation

- Évaluation de l'utilisabilité et l'efficacité de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph avec des experts du domaine.
- Évaluation de l'accessibilité et la compréhensibilité de la visualisation générée à l'aide de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph dans le cadre de CAPTAIN MEMO avec des malades d'Alzheimer.

² <http://dbpedia.org/>

- Évaluation de l'accessibilité des interfaces utilisateurs de CAPTAIN MEMO avec des malades d'Alzheimer.
- Évaluation de l'efficacité du service Autobiographical Training avec des malades d'Alzheimer.
- Évaluation de notre approche DBE_ALZ dans le cadre de CAPTAIN MEMO avec des malades d'Alzheimer.

1.4. Liste des publications

Revue internationale avec comité de lecture

- E. Métais, **F. Ghorbel**, F. Hamdi, N. Ellouze, N. Herradi et A. Soukane, “Representing Imprecise Time Intervals in OWL 2”, In: Enterprise Modelling and Information Systems Architectures -International Journal of Conceptual Modeling, pp. 120-132, 2018.
- E. Métais, **F. Ghorbel**, N. Herradi, F. Hamdi, N. Lammari, D. Nakache, N. Ellouze, F. Gargouri et A. Soukane, “Memory Prosthesis”, In: Non-pharmacological Therapies in Dementia, 3(2), pp. 177-180, 2015.

Revue nationale avec comité de lecture

- **F. Ghorbel**, E. Métais, N. Ellouze et F. Gargouri, « Un outil de visualisation d'ontologies pour le web des données, utilisable par tous », In : Ingénierie des systèmes d'information, 21(5-6/2016), pp. 107-132, 2016.

Conférences internationales avec comité de lecture

- **F. Ghorbel**, F. Hamdi, E. Métais, N. Ellouze et F. Gargouri, “A Fuzzy-Based Approach for Representing and Reasoning on Imprecise Time Intervals in Fuzzy-OWL 2 Ontology”, In: International Conference on Natural Language & Information Systems, pp.12, Paris, France, 2018.
- **F. Ghorbel**, F. Hamdi, N. Ellouze, E. Métais et F. Gargouri, “Visualizing Large-scale Linked Data with Memo Graph”, In: International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering System, pp.10, Marseille, France, 2017.

- **F. Ghorbel**, E. Métais, N. Ellouze, F. Hamdi et F. Gargouri, “Towards Accessibility Guidelines of Interaction and User Interface Design for Alzheimer’s Disease Patients”, In: International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, pp.7, Nice, France, 2017.
- **F. Ghorbel**, N. Ellouze, E. Métais, F. Hamdi et F. Gargouri, “MEMO Calendring: a Smart Reminder for Alzheimer’s Disease Patients”, In: International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities, pp.6, Sfax, Tunisie, 2017.
- **F. Ghorbel**, N. Ellouze, E. Métais, F. Hamdi, F. Gargouri et N. Herradi, “MEMO GRAPH: An Ontology Visualization Tool for Everyone”, In: International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, 96(2016), pp.265-274, York, UK, 2016.
- **F. Ghorbel**, N. Ellouze, E. Métais, F. Gargouri, F. Hamdi et N. Herradi, “Designing and Evaluating Interfaces for the CAPTAIN MEMO Memory Prosthesis”, In: International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, pp.6, Venise, Italie, 2016.
- N. Herradi, F. Hamdi, **F. Ghorbel**, E. Métais, N. Ellouze et A. Soukane, “Dealing with Family Relationships in Linked Data”, In: IWICM 2015, pp.5, 2015.
- N. Herradi, F. Hamdi, E. Métais, **F. Ghorbel** et A. Soukane, “PersonLink: An Ontology Representing Family relationships for the CAPTAIN MEMO Memory Prosthesis”, In: ER 2015 (Workshop AHA), pp.3-13, Stockholm, Sweden, 2015.

Chapitre de livre

- E. Métais, F. Hamdi, N. Lammari, D. Nakache **F. Ghorbel**, N. Ellouze, N. Herradi et A. Soukane, « Vers un système d'information personnel pour l'aide à la dégénérescence de mémoire », In: Ingénierie et management des systèmes d'information, pp. 227-241, 2016.

Rapport scientifique

- E. Métais, D. Nakache, N. Herradi et **F. Ghorbel**, « Rapport final du projet VIVA : Vivre à Paris avec Alzheimer grâce aux nouvelles technologies », 134 pages, 2014/12/31.

1.5. Organisation du mémoire

Nous présentons dans cette section l'organisation de ce manuscrit. Ce mémoire de thèse comporte **8 chapitres**. Dans le **second chapitre**, nous présentons nos travaux sur l'accessibilité des interfaces utilisateurs aux malades d'Alzheimer : notre méthodologie de conception InterfaceToAlz et notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie. Le **troisième chapitre** présente notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph, qui se base sur notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie et notre approche IKIEV - approche pour offrir une visualisation accessible et compréhensible aux malades d'Alzheimer - Dans le **quatrième chapitre**, nous présentons notre typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO, ainsi que notre méthodologie générale de l'estimation et l'amélioration de la qualité des données. Dans le **cinquième chapitre**, nous présentons nos travaux sur l'estimation qualitative et quantitative de la crédibilité des données saisies dans CAPTAIN MEMO. Dans le **sixième chapitre**, nous détaillons nos deux approches qui permettent la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le contexte de l'ontologie. Avant de conclure nos travaux réalisés et présenter nos perspectives dans le **huitième chapitre**, nous présentons dans le **septième chapitre** le prototype de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO et ses évaluations.

CHAPITRE 2 :

Accessibilité des interfaces utilisateurs aux malades d'Alzheimer

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons **notre méthodologie de conception et notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer.**

Les patients d'Alzheimer, généralement très âgés [Farage et al., 2012] [Niels et al., 2013], sont souvent atteints de plusieurs déficiences sensorielles (par exemple : déficiences visuelles, auditives, tactiles, etc.) et intellectuelles (par exemple : pertes de mémoire, déficit cognitif, etc.) à divers niveaux [Moutinho, 2011] [Niels et al., 2013]. Ces dernières les empêchent d'utiliser les interfaces utilisateurs standards [De Boer, 2008] [Friedman et Bryen, 2012] [Ancient et Good, 2013]. Plusieurs études montrent que la difficulté d'utilisation des interfaces utilisateurs est l'une des raisons qui empêchent cet utilisateur particulier de profiter des nouvelles technologies [De Boer, 2008] [Ancient et Good, 2013].

La société dans son ensemble et l'offre numérique s'ouvrent aux utilisateurs porteurs de handicaps, avec l'avènement du « **Design for all** ». Les interfaces utilisateurs doivent tenir compte des incapacités de leurs cibles [Hunter et al., 2007] [Ancient et Good, 2013] afin d'être accessibles et faciles à utiliser. À notre connaissance, **il n'existe pas dans la littérature une méthodologie de conception et un guide complet de bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer.** Dans cette direction, nous effectuons une étude ergonomique pour assurer l'accessibilité et la facilité d'utilisation des interfaces utilisateurs aux malades d'Alzheimer. La conception des interfaces utilisateurs pour cet utilisateur particulier est un processus très délicat. Elle nécessite d'adapter soigneusement leurs caractéristiques et la dynamique des interactions au profit de ce dernier.

Nous proposons **une méthodologie de conception centrée utilisateur et itérative, appelée InterfaceToAlz, qui vise à concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer** (première contribution). La première étape consiste à proposer un guide de bonnes pratiques d'ergonomie. La seconde étape consiste à concevoir les interfaces utilisateurs en se fondant sur ce dernier. La troisième étape consiste à évaluer l'accessibilité des interfaces utilisateurs implémentées pour les améliorer.

Nous nous basons sur notre méthodologie de conception InterfaceToAlz pour proposer **un guide de bonnes pratiques d'ergonomie que les concepteurs pourront suivre pour**

concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer (seconde contribution). En effet, nous identifions les incapacités cliniques et psychologiques relatives à cet utilisateur particulier. Ensuite, nous collectons à partir de la littérature 145 bonnes pratiques d'ergonomie. Puis, nous les classifions selon les incapacités identifiées. Enfin, nous effectuons un deuxième processus de classification selon un ensemble de critères d'ergonomie inspirés de la littérature.

La suite de ce chapitre est structurée comme suit. La section 2.2 présente notre état de l'art détaillant quelques préliminaires relatifs à ce travail. La section 2.3 détaille notre méthodologie de conception InterfaceToAlz. La section 2.4 présente notre travail aboutissant à notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie. Enfin, dans la section 2.5, nous terminons par une conclusion et quelques perspectives.

2.2. État de l'art

Nous commençons tout d'abord par la présentation de la maladie d'Alzheimer. Ensuite, nous définissons le concept de l'utilisabilité. Puis, nous étudions la conception centrée utilisateur. Enfin, nous présentons quelques méthodes d'aide à la conception et à l'évaluation de l'utilisabilité.

2.2.1. Maladie d'Alzheimer

Cette section présente la maladie d'Alzheimer. Nous définissons en premier lieu la démence. Puis, nous définissons la maladie d'Alzheimer. Ensuite, nous présentons ses chiffres clés ainsi que ses différents stades. La dernière section aborde la problématique de la prise en charge de cette maladie.

2.2.1.1. Définition de la démence

La démence est un mot dérivé du latin « dementia » signifiant hors de l'esprit. En 2016, l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) a défini la démence par les termes suivants « la démence est un syndrome, généralement chronique ou évolutif, dans lequel on observe une altération de la fonction cognitive (capacité d'effectuer des opérations de pensée), plus importante que celle que l'on pourrait attendre du vieillissement normal. Elle affecte la mémoire, le raisonnement, l'orientation, la compréhension, le calcul, la capacité d'apprentissage, le langage et le jugement. La conscience n'est pas touchée. Une détérioration

du contrôle émotionnel, du comportement social ou de la motivation accompagne souvent, et parfois précède, les troubles de la fonction cognitive ». Le nombre de personnes souffrant d'une démence est en perpétuelle augmentation [Livingston et al., 2017].

Nous distinguons des démences dégénératives, conséquence d'une dégénérescence des cellules du cerveau, et des démences non dégénératives, dues à des pathologies d'ordre infectieux, vasculaire, traumatique, tumorale ou toxique. **Parmi les démences dégénératives, la plus répandue est sans conteste la maladie d'Alzheimer.** En 2016, l'OMS estime que cette maladie représente de 50% à 80% des cas de démences dans le monde. D'autres études, comme [Moutinho, 2011] et [Niels et al., 2013], ont donné presque la même estimation.

2.2.1.2. Définition de la maladie d'Alzheimer

Cette maladie tient son nom du neurologue et psychiatre allemand Aloïs Alzheimer qui, en 1906, a associé les symptômes (déclin progressif des fonctions cognitives) à des lésions cérébrales spécifiques (plaques amyloïdes) grâce à l'étude de sa patiente Augusta Deter. Par la suite, d'autres chercheurs ont confirmé ses études, et un deuxième cas identique en 1911 a validé définitivement sa théorie.

La maladie d'Alzheimer est une **maladie neurodégénérative** (perte progressive de neurones) du tissu cérébral provoquée par l'accumulation en plaques de peptides anormaux bêta-amyloïdes dans le cerveau et l'augmentation de la capacité de phosphorylation de la protéine tau, qui entraîne une détérioration progressive et définitive des cellules nerveuses, provoquant une démence sénile. Elle entraîne la perte des fonctions mentales et notamment de la mémoire, avec un retentissement sur la vie quotidienne des malades. Elle amène progressivement une détérioration intellectuelle et des pertes des capacités cognitives [Chilukoti et al., 2007], entraînant des manifestations psychologiques et des troubles du comportement conduisant à une perte d'autonomie. Elle se distingue des autres démences par le fait qu'elle évolue graduellement et touche surtout la mémoire à court terme, dans ses débuts. Contrairement aux idées reçues, la maladie d'Alzheimer n'est pas une conséquence normale du vieillissement. Selon l'OMS, **cette maladie est le problème de santé le plus grave du 21e siècle.**

2.2.1.3. Prévalence et incidence de la maladie d'Alzheimer

La « prévalence » désigne le nombre (ou pourcentage) total de malades affectés par une pathologie, alors que l'« incidence » désigne le nombre (ou pourcentage) de cas nouveaux apparus durant une période de temps donnée.

Prévalence et incidence de la maladie d'Alzheimer dans le monde : le nombre des malades d'Alzheimer est en perpétuelle augmentation [Riley-Doucet et Debnath, 2007] [Chilukoti et al., 2007]. Ce phénomène est dû au vieillissement de la population [IJsselsteijn et al., 2007] [Rialle, 2007] [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014]. Cette maladie affecte environ 10% des personnes âgées [Pleckaityte, 2010]. Selon la fédération internationale des associations d'Alzheimer, cette maladie touche, en 2015, près de 46,8 millions de personnes [Prince et al., 2015]. Selon les prévisions de l'OMS, le nombre de malades devrait presque doubler tous les 20 ans, pour passer à 65,7 millions en 2030 et à 115,4 millions en 2050. L'incidence annuelle mondiale est estimée à 1,25 million malades. C'est l'équivalent d'un nouveau cas toutes les 25 secondes !

Prévalence et incidence de la maladie d'Alzheimer en Tunisie : le nombre des Tunisiens atteints de la maladie d'Alzheimer en 2015 est estimé à 57 000 et il sera multiplié par quatre en 2030 [Association internationale d'Alzheimer, 2017].

Prévalence et incidence de la maladie d'Alzheimer en France : en 2007, le nombre de malades d'Alzheimer est près de 800 000 cas [Rialle, 2007]. Selon l'étude PAQUID, 850 000 personnes souffrent de cette maladie en 2008 [Millet, 2009]. Ce nombre est à l'ordre de 900 000 cas en 2015 [Alzheimer's Disease International (ADI), 2015]. En 2020, ce nombre est estimé à 1,3 million selon [ADI, 2015] et il est estimé à 1,2 million selon [Millet, 2009] (c'est l'équivalent de 25% de la population de plus de 65 ans). En 2040, ce nombre est estimé à 2,1 millions [Millet, 2009]. 60% des Français atteints par cette maladie vivent seuls à domicile [Ramaroson et al., 2003]. Les nouveaux cas diagnostiqués chaque année sont de l'ordre de 220 000 selon [Millet, 2009].

2.2.1.4. Évolution de la maladie d'Alzheimer

Il existe une grande variabilité interindividuelle concernant la progression de la maladie d'Alzheimer. Comme le proposent [Phaneuf et Bal-Craquin, 2007], l'évolution de cette maladie peut être découpée en **quatre stades en fonction du Mini Mental State Examination (MMSE)**³ ou test de Folstein [Folstein et McHugh, 1975] :

- **Stade préclinique (stade asymptomatique)** : ce stade peut s'étendre de 15 à 25 ans durant lesquels les lésions cérébrales apparaissent silencieusement. Progressivement,

³ MMSE est un questionnaire de trente questions permettant de tester les facultés cognitives et de mémorisation d'une personne. MMSE touche aux sphères de la mémoire, de l'apprentissage, du langage, du calcul, des repères spatio-temporels, du raisonnement de la transcription et de l'attention. Ce test permet de quantifier la gravité du stade de la maladie d'Alzheimer.

quelques symptômes décelables émergent tels que des oublis plus fréquents, le manque du mot, l'égarément des objets, l'humeur changeante, les difficultés de pensées abstraites et le manque d'intérêt.

- **Stade léger (MMSE supérieur à 20)** : ce stade dure de 2 à 4 ans. Le malade exprime des difficultés à retenir des informations récentes, à faire de nouveaux apprentissages et à suivre des conversations. Le manque du mot, les troubles de l'orientation et les troubles de la concentration et de l'attention s'aggravent. Des manifestations comportementales apparaissent également : le stress, l'anxiété, le désintérêt et la dépression qui résultent de la prise de conscience des déclin.
- **Stade modéré (MMSE compris entre 10 et 20)** : ce stade peut s'étendre de 2 à 6 ans. À ce stade, les déclin cognitifs affectent l'autonomie de la personne. Les symptômes décrits au stade léger s'accroissent. Les pertes de la mémoire s'aggravent. La mémoire des faits récents est très altérée. La mémoire des faits anciens commence à être perturbée. Les troubles de l'orientation spatiale et temporelle s'accroissent. Les changements du comportement et de la personnalité sont marqués.
- **Stade sévère (MMSE inférieur à 10)** : ce stade peut s'étendre de 2 à 4 ans. Il est marqué par une détérioration très grave de tous les symptômes décrits précédemment. La mémoire des faits anciens est altérée. La communication est presque nulle. Le malade ne reconnaît plus ses proches ni ses soignants. Il ne répond pas aux stimulations extérieures. La dépendance devient totale.

2.2.1.5. Prise en charge de la maladie d'Alzheimer

À l'heure actuelle, **il n'existe aucun traitement pharmacologique curatif ou préventif qui permet de stopper de façon définitive la progression de la maladie d'Alzheimer**. Les différents médicaments, qui existent aujourd'hui, montrent une relative efficacité sur les fonctions cognitives, l'autonomie et le comportement [Olazarán et al., 2010] [Sarnecki-Fleischmann, 2013]. Néanmoins, leur action est purement symptomatique, sans impact réel sur l'évolution des lésions cérébrales [Seixas et al., 2008]. Face aux limites de ces traitements, **diverses alternatives non-pharmacologiques voient le jour ces dernières années [Chilukoti et al., 2007]. Ces alternatives, en complément des traitements pharmacologiques, sont proposées actuellement comme prise en charge de cette maladie [Chilukoti et al., 2007].**

Les interventions non-pharmacologiques retardent la progression de la maladie d'Alzheimer [Chilukoti et al., 2007] [Olazarán et al., 2010], peuvent réduire les déficiences

fonctionnelles [Yu et al., 2009] [Olazarán et al., 2010] [Makedon et al., 2010] [Sarnecki-Fleischmann, 2013] et **aident le malade à retenir quelques données plus longtemps** [Yu et al., 2009] [Zmily et Abu-Saymeh, 2013]. Donc, elles contribuent à **améliorer la qualité de vie des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer ainsi que leurs soignants** [Yu et al., 2009] [Makedon et al., 2010] [Olazarán et al., 2010] [Sarnecki-Fleischmann, 2013] [Zmily et Abu-Saymeh, 2013]. Selon [ANAES, 2003], les interventions non-pharmacologiques poursuivent plusieurs objectifs : (1) l'amélioration des fonctions cognitives, des troubles du comportement et de l'humeur ; (2) la préservation de l'autonomie ; (3) la réduction du stress lié à cette maladie ; (4) la préservation des échanges sociaux ; (5) le report du placement en institution ; et (6) l'aide des soignants sur le plan moral et physique. Selon l'Agence Nationale de l'Évaluation et de la Qualité des Établissements et Services Sociaux et Médicaux-Sociaux (ANESM), les interventions non-pharmacologiques concourent au maintien ou à la réhabilitation des capacités fonctionnelles, des fonctions cognitives et sensorielles et au maintien du lien affectif et social.

Il existe différentes catégories de thérapies non-pharmacologiques destinées aux personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer [Dorenlot, 2006] :

- **Les interventions centrées sur l'affect** qui concernent principalement les interventions de validation et les interventions de réminiscence. Ces thérapies s'articulent autour de l'évocation des souvenirs autobiographiques et anciens des malades.
- **Les interventions centrées sur l'environnement** des malades ont pour objet d'adapter l'environnement humain et physique des malades d'Alzheimer. Elles concernent la mise en place de lieux de vie adaptés aux personnes souffrant de cette maladie.
- **Les interventions centrées sur la cognition** renvoient principalement à quatre types de programmes : la stimulation cognitive, la réadaptation cognitive, l'entraînement cognitif et les thérapies d'orientation dans la réalité. Ces interventions ont bénéficié d'un nombre important d'études. Elles ont pour objectif de stabiliser le déclin des fonctions cognitives, voire d'améliorer leur fonctionnement.
- **Les interventions centrées sur l'activité physique** correspondent à des thérapies basées sur l'activité physique adaptée aux conditions physiques des malades.

L'OMS recommande aux autorités de mettre en place des programmes, destinés aux malades d'Alzheimer, principalement axés sur la réduction de la stigmatisation et la fourniture de soins de qualité. De plus, d'après les résultats d'une étude menée dans [Rajarithnam, 2007], les participants présentant des troubles de la mémoire et ayant utilisé des PDA ont été capables d'améliorer leur indépendance dans les tâches de tous les jours, avec un effet de durabilité de ces avantages même si la personne a cessé de les utiliser. La prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO sur laquelle nous nous sommes centrés dans cette thèse est une intervention centrée sur la cognition.

2.2.2. Concept de l'utilisabilité

La première utilisation du mot utilisabilité (usability) a été enregistrée dans la citation de Shackel "*it is not utility, but usability of a thing which is in question*" [Shackel, 1984]. **Aucune définition précise et définitive de l'utilisabilité n'existe réellement** [Alonso-Ríos et al., 2009].

La norme ISO 9241-11⁴ définit l'utilisabilité comme « le degré selon lequel un produit peut être utilisé, par des utilisateurs identifiés, pour atteindre des buts définis avec efficacité, efficacité et satisfaction, dans un contexte d'utilisation spécifié ». Elle définit l'efficacité, l'efficacité et la satisfaction comme suit :

- **L'efficacité** concerne la réalisation des buts de l'activité par l'utilisateur. Un service ou un produit est efficace s'il permet à l'utilisateur d'atteindre le résultat prévu.
- **L'efficacité** fait référence aux ressources dépensées pour atteindre le but visé. Un service ou un produit est efficace si l'utilisateur atteint le résultat avec un effort moindre ou requiert un temps minimal.
- **La satisfaction** se réfère au bien-être, au plaisir et au confort ressenti par l'utilisateur, c'est-à-dire la manière dont l'utilisateur apprécie son interaction avec l'application.

Un objet peut être défini comme étant utilisable en référence à un type d'utilisateur précisé et un contexte spécifique. **L'utilisabilité désigne la « facilité d'utilisation » et « facilité d'apprentissage » d'un service ou d'un produit.** Il existe divers modèles de

⁴ Ergonomie de l'interaction homme-système ; Partie 11: Utilisabilité -- Définitions et concepts [Organisation Internationale de Normalisation, 1998]

l'utilisabilité : le modèle de Nielsen [Nielsen, 1994], le modèle de Dillon et Morris [Dillon et Morris, 1999], le modèle de Hertzum [Hertzum, 2010], etc.

2.2.3. Vers une conception anthropocentrée : la conception centrée utilisateur

Selon [Morand, 1994], « la conception est un processus collectif et cognitif de production et connaissance ». Ce processus est organisé en différentes phases qui suivent un modèle de conception.

La **conception centrée utilisateur** (user-centered design) consiste à **prendre en considération les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de conception d'un produit** [Magnier et al., 2015]. L'objectif est de fournir une application facile à utiliser. La conception centrée utilisateur fait l'objet d'une norme internationale : ISO 9241-210⁵. Cette norme la définit comme « une manière de concevoir les systèmes interactifs, ayant pour objet spécifique de rendre les systèmes utilisables ». Elle définit les conditions de la mise en œuvre d'un processus centré utilisateur selon les quatre principes de base présentés ci-dessous :

- **La participation active des utilisateurs** durant l'ensemble du cycle de conception ;
- Une répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie.
- **De nombreuses itérations** durant le cycle de conception pour faciliter le retour des expériences des utilisateurs après utilisation des premières solutions de conception.
- L'intervention d'une **équipe de conception pluridisciplinaire**.

La norme ISO 9241-210 définit les étapes du cycle de conception centrée utilisateur comme suit (Figure 1) :

- **Planifier le processus de conception centrée utilisateur** : cette étape consiste à planifier les activités de développement dans une optique de démarche centrée utilisateur.
- **Comprendre et spécifier le contexte d'utilisation** : il s'agit de comprendre la population cible et ses caractéristiques (connaissances, compétences, fonctions, tâches à accomplir, niveau d'expérience métier et d'expérience de l'outil informatique, langage, éducation, formation, caractéristiques physiques,

⁵ Ergonomie de l'interaction homme-système ; Partie 210: Conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs [Organisation Internationale de Normalisation, 2010]

caractéristiques psychologiques, habitudes et aptitudes). Des méthodes fondées sur l'observation et le recours aux questionnaires sont des sources d'information pour l'ergonome.

- **Spécifier les exigences liées à l'utilisateur et à l'organisation** : cette étape consiste à spécifier les exigences liées à l'utilisateur et à l'organisation. Il s'agit de prendre en compte les besoins, les compétences et l'environnement de travail de tous les intervenants pertinents sur le système.
- **Produire des solutions de conception** : cette étape vise à utiliser les connaissances acquises lors des étapes précédentes pour matérialiser les solutions afin de pouvoir les modifier en fonction des feedbacks utilisateurs.
- **Évaluer les solutions conçues au regard des exigences** : les prototypes créés au stade précédent sont utilisés pour évaluer les solutions conçues. L'objectif de l'évaluation des solutions est de recueillir un feedback sur la conception développée. Il permet d'améliorer la conception.

Les utilisateurs doivent être impliqués dans l'ensemble de ces étapes. Ces dernières sont **interdépendantes**. **De nombreuses itérations sont fréquemment nécessaires**. Lors de chaque itération, les utilisateurs fournissent des feedbacks permettant d'améliorer le système.

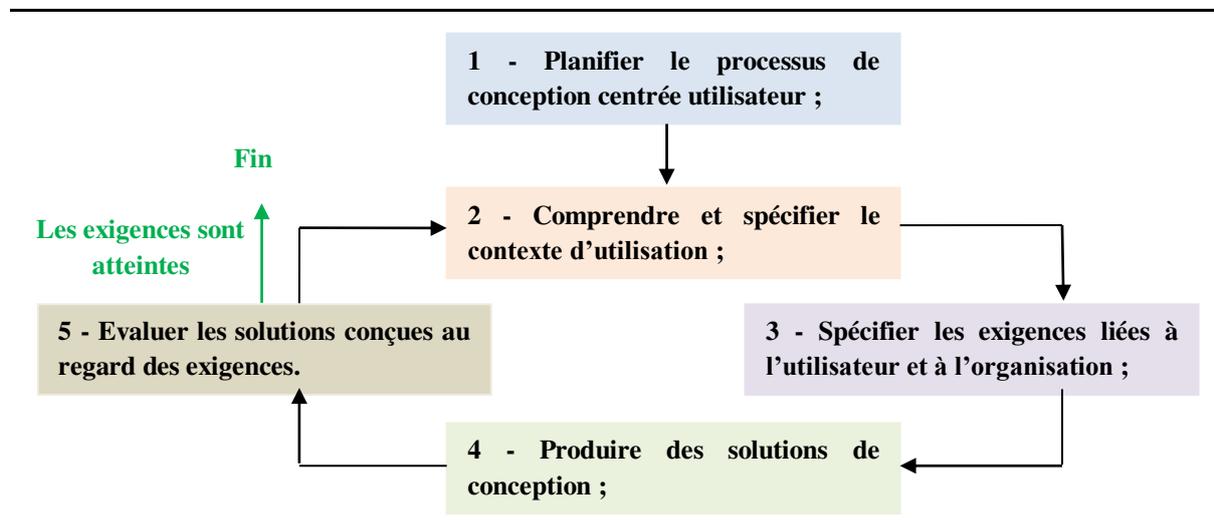


Figure 1. Étapes du processus de la conception centrée utilisateur selon la norme ISO 9241-210.

2.2.4. Méthodes d'aide à la conception et à l'évaluation de l'utilisabilité

Dans le cadre d'une démarche de conception centrée utilisateur, la conception se déroule de manière **itérative**. Le produit ou le service en conception va régulièrement être

évalué tout au long du processus de la conception, jusqu'à ce qu'il réponde suffisamment aux exigences définies. Il existe de **nombreuses méthodes permettant d'évaluer le degré d'utilisabilité et d'acceptabilité du système** [Ezzedine et al., 2012].

La norme ISO 16982⁶ liste les méthodes d'évaluation d'utilisabilité pour la conception centrée utilisateur et identifie deux catégories : (1) **celles impliquant la participation des utilisateurs** et (2) **celles n'impliquant pas la participation directe des utilisateurs**. Les méthodes impliquant l'utilisateur final permettent de détecter les problèmes réels que rencontre ce dernier [Ezzedine et al., 2012]. Dans cette section, nous nous intéressons à présenter **une méthode n'impliquant pas les utilisateurs finaux (analyse heuristique)** et **trois méthodes impliquant la participation des utilisateurs finaux (interview, test utilisateurs et questionnaire)**.

2.2.4.1. Analyse heuristique

L'analyse heuristique est une méthode d'évaluation de l'utilisabilité n'impliquant pas les utilisateurs finaux. Elle consiste à **inspecter l'interface utilisateur en la comparant à une liste de critères, appelés « heuristiques »**. Elle ne permet pas l'évaluation de l'adéquation des fonctionnalités avec les besoins des utilisateurs finaux, ni l'étude des interactions avec le produit, mais seulement de constater des écarts par rapport aux standards décrits par les heuristiques. Il existe plusieurs grilles d'analyse : les critères de Bastien et Scapin [Bastien et Scapin, 1992], les heuristiques de Nielsen [Nielsen, 1994], les golden rules de Shneiderman [Shneiderman et al., 2009], etc.

2.2.4.2. Interview

Les interviews (les entretiens) visent à **recueillir des informations qualitatives concernant les attentes, les souhaits ou les opinions des utilisateurs sur une solution précise**. Les thèmes abordés sont prédéfinis, mais l'ordre reste libre. L'utilisateur doit se sentir libre dans ses réponses et peut introduire des thèmes non définis s'il le souhaite. L'efficacité de l'interview dépend de sa préparation et des compétences de l'évaluateur.

2.2.4.3. Test utilisateur

Il s'agit de **confronter l'utilisateur au système par le biais d'une mise en situation qui vise à étudier les performances et les comportements verbaux et non-verbaux**.

⁶ Ergonomie de l'interaction homme-système -- Méthodes d'utilisabilité pour la conception centrée sur l'opérateur humain [Organisation Internationale de Normalisation, 2002]

L'analyse de l'activité des utilisateurs peut se faire face à une interface utilisateur fonctionnelle, mais également une maquette ou un prototype. Cette méthode permet d'observer directement la façon dont l'utilisateur se sert d'un système et identifier concrètement les véritables difficultés qu'il rencontre. L'interaction peut être libre (l'utilisateur n'a pas d'objectif précis) ou scénarisée (le sujet doit atteindre un objectif précis).

2.2.4.4. Questionnaire

2.2.4.4.1. Définition

Le questionnaire est **une technique d'interrogation individuelle, standardisée et composée d'une série de questions**. Cette technique possède l'avantage d'être économique et utilisable dans la plupart des situations [Ezzedine et al., 2012]. Nous trouvons différents types de questions qui permettent d'évaluer un aspect particulier du système ou tout simplement d'avoir l'opinion de l'utilisateur :

- **Les questions ouvertes** : elles permettent à l'utilisateur de s'exprimer librement en utilisant son propre langage. Elles ne sont pas recommandées quand il s'agit d'évaluer un aspect bien déterminé du système. Dans ce cas, il faut privilégier les questions fermées.
- **Les questions fermées** : à l'inverse des questions ouvertes, elles proposent un ensemble de réponses prédéterminées. Ces questions sont à la base des Questions à Choix Multiples (QCM). L'évaluateur peut imposer à l'utilisateur une réponse unique ou lui laisser la possibilité d'effectuer plusieurs choix.
- **Les questions scalaires** : elles permettent à l'utilisateur d'exprimer son opinion sur une échelle prédéfinie. Cette échelle peut avoir seulement deux valeurs (échelle binaire : Vrai/Faux) ou plusieurs valeurs (échelle multiple : de 1 à 5 par exemple). Selon [Baccino et al., 2005], les questions scalaires à échelle multiple sont classées en trois catégories : échelle de Likert (interrogation de l'utilisateur sur son accord ou son désaccord avec une assertion), échelle de rang (invitation de l'utilisateur à ranger par ordre d'importance des réponses à une question) et échelle sémantique différentielle (nous demandons à l'utilisateur de juger le système selon deux listes d'antonymes ; par exemple : facile, utile, plaisant et rapide).

Il existe des questionnaires standardisés qui permettent de mesurer l'utilisabilité d'une interface utilisateur : Software Usability Measurement Inventory (SUMI) [Kirakowski et Corbett, 1993], Computer System Usability Questionnaire (CSUQ) [Lewis, 1995], System

Usability scale (SUS) [Brooke, 1996], Website Analysis Measurement Inventory (WAMMI) [Kirakowski et al., 1998], Website User Satisfaction (WUS) [Muylle et al., 1999], etc.

2.2.4.4.2. Questionnaire System Usability Scale

Nous nous limitons à la présentation du questionnaire SUS. Ce questionnaire est régulièrement utilisé et plusieurs études ont porté sur sa validité. Nous utilisons ce questionnaire pour évaluer l'utilisabilité de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph, présenté dans le troisième chapitre.

Le questionnaire SUS permet d'évaluer l'utilisabilité et la convivialité de n'importe quelle interface utilisateur. Il utilise l'échelle de Lickert. Pour chacune des questions posées, l'utilisateur choisit entre 5 réponses possibles allant de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord). Il se compose des dix questions suivantes :

1. Je pense que je vais utiliser ce système fréquemment ;
2. J'ai trouvé le système inutilement complexe ;
3. J'ai trouvé le système facile à utiliser ;
4. Je pense que j'aurai besoin d'une aide technique pour arriver à utiliser ce système ;
5. J'ai trouvé que les différentes fonctionnalités du système sont bien intégrées ;
6. J'ai trouvé qu'il y avait trop d'incohérences dans le système ;
7. Je pense que la plupart des gens peuvent appréhender ce système très rapidement ;
8. J'ai trouvé le système lourd à utiliser ;
9. Je me suis senti en confiance en utilisant le système ;
10. J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir utiliser le système.

Le score SUS est compris entre 0 et 100. Les étapes du calcul de ce score sont les suivantes :

1. Pour les questions impaires qui sont d'aspect positif, nous soustrayons 1 du résultat fourni par le répondant (par exemple : si la réponse est 4, le score est 3 (4-1)) ;
2. Pour les questions paires qui sont d'aspect négatif, le score est égal à 5 moins le score fourni par le répondant (par exemple : si le score fourni par le répondant est 3, le score est de 2 (5-3)) ;
3. Nous devons calculer le total et le multiplier par 2,5.

En général, un score SUS est « bon » à partir de 75, passable ou correct entre 50 et 75. Un score inférieur à 50 révèle de gros problèmes.

2.3. Notre méthodologie InterfaceToAlz pour la conception d'interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer

Dans cette section, nous présentons notre **méthodologie de conception InterfaceToAlz**. Elle définit un **ensemble d'étapes à suivre pour proposer des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer**. La Figure 2 résume cette méthodologie. Elle est orientée utilisateur, itérative et formée par ces trois phases :

- **Phase 1 « Guide de bonnes pratiques d'ergonomie »** : le but est de proposer un guide de bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir des interfaces utilisateurs pour les malades d'Alzheimer. Pour définir les sous-phases aboutissant à ce dernier, nous nous inspirons du travail de [Loureiro et Rodrigues, 2014] qui définit un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs tactiles pour les personnes âgées. Quatre sous-phases sont définies :
- **Phase 1.1 « Caractéristiques des malades d'Alzheimer »** : comme nous adoptons une méthode de conception centrée utilisateur, nous devons tout d'abord étudier les caractéristiques spécifiques des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Cette sous-phase se fonde sur une étude bibliographique des différents travaux sur les incapacités cliniques et psychologiques relatives à cet utilisateur particulier. Ensuite, nous faisons intervenir des malades de différents stades d'Alzheimer. Nous proposons un questionnaire permettant de vérifier si les participants présentent ou pas les incapacités identifiées.
- **Phase 1.2 « Section des travaux »** : nous sélectionnons, à partir de la littérature, des travaux qui se focalisent sur l'accessibilité des interfaces utilisateurs pour les personnes porteuses de handicap, les personnes souffrant d'une démence, les personnes âgées, les personnes souffrant d'une dyslexie et les personnes atteintes d'une aphasie.
- **Phase 1.3 « Extraction des bonnes pratiques d'ergonomie »** : nous recueillons, à partir des travaux identifiés à partir de la Phase 1.2, les bonnes pratiques d'ergonomie. Ensuite, nous les arrangeons pour éviter les redondances et générer des bonnes pratiques d'ergonomie uniques. Nous les rassemblons en fonction des

catégories identifiées à partir de la Phase 1.1. Enfin, nous ajoutons, pour chaque catégorie, les bonnes pratiques d'ergonomie manquantes.

- **Phase 1.4 « Consolidation »** : nous effectuons un deuxième processus de regroupement. Nous réunissons les bonnes pratiques d'ergonomie, de chaque catégorie, selon un ensemble de critères d'ergonomie inspirés de la littérature.
- **Phase 2 « Conception des interfaces utilisateurs »** : en se basant sur le guide de bonnes pratiques d'ergonomie, proposé dans la Phase 1, les concepteurs et les informaticiens conçoivent et implémentent les interfaces utilisateurs proposées aux malades d'Alzheimer .
- **Phase 3 « Évaluation des interfaces utilisateurs »** : cette phase a pour but l'évaluation des interfaces utilisateurs implémentées. Elle fait intervenir des malades de différents stades d'Alzheimer.

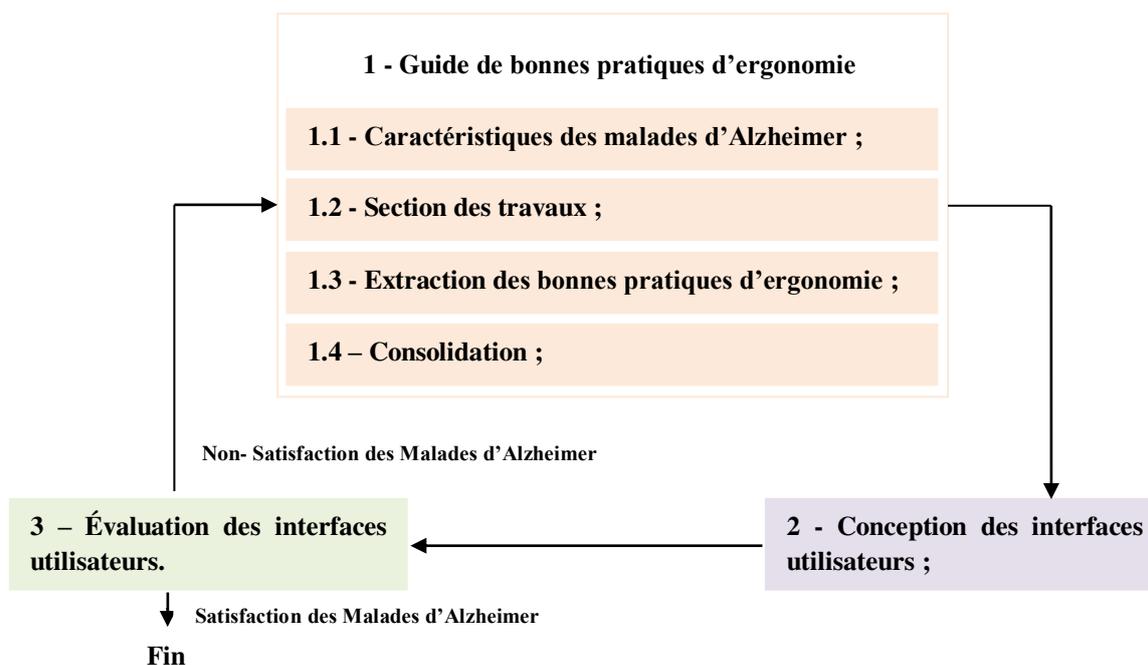


Figure 2. Notre méthodologie de conception InterfaceToAlz.

La méthodologie de conception présentée est **généralisable à d'autres types d'utilisateurs** (par exemple : les enfants atteints d'autisme, les personnes âgées, les personnes non voyantes, etc.) et à **d'autres types d'interfaces utilisateurs** (par exemple : les interfaces haptiques, les interfaces tactiles, etc.).

2.4. Notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer

Dans cette section, nous présentons notre **guide de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer**. Nous suivons les **quatre sous-phases de la première phase de notre méthodologie InterfaceToAlz**.

2.4.1. Caractéristiques des malades d'Alzheimer

La maladie d'Alzheimer survient généralement chez les **adultes à partir de 65 ans** [Niels et al., 2013]. Ainsi, les malades d'Alzheimer souffrent de certains déficits liés au **processus normal du vieillissement** [Farage et al., 2012]. Nous classifions les incapacités relatives à cet utilisateur en deux catégories : « **incapacités liées à la maladie d'Alzheimer** » et « **incapacités liées au processus normal du vieillissement** », comme le montre la Figure 3.

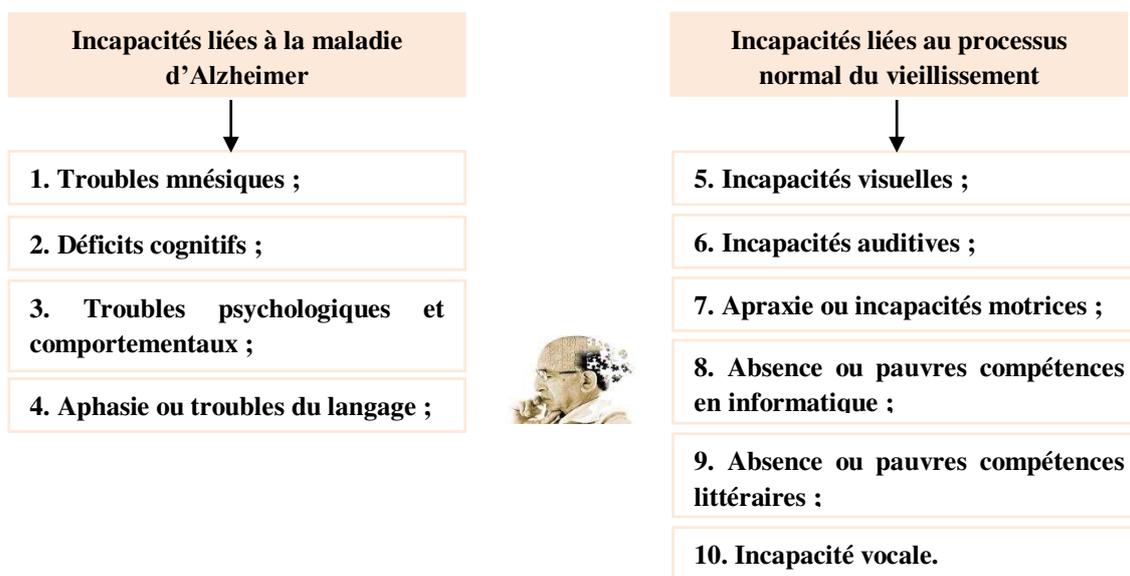


Figure 3. Incapacités liées à la maladie d'Alzheimer et au processus normal du vieillissement.

2.4.1.1. Incapacités liées à la maladie d'Alzheimer

Nous identifions quatre incapacités liées à la maladie d'Alzheimer : « **troubles mnésiques** », « **déficits cognitifs** », « **troubles psychologiques et comportementaux** » et « **aphasie ou troubles du langage** ».

Troubles mnésiques : les troubles mnésiques représentent la pierre angulaire des symptômes de la maladie d'Alzheimer [Riley-Doucet et Debnath, 2007] [Gowans et al., 2007] [Rialle, 2007] [Chilukoti et al., 2007] [Wang, 2010] [Moutinho, 2011] [Niels et al., 2013] [Ancient et Good, 2013]. Cette maladie affecte la mémoire épisodique (mémoire à court terme ou mémoire de travail) et la mémoire sémantique (mémoire à long terme).

Tulving définit la mémoire épisodique comme la capacité à se souvenir de manière consciente d'épisodes personnellement vécus et des informations associées à un contexte spatio-temporel particulier [Tulving, 1995]. C'est la mémoire qui assure la fonction d'enregistrement d'informations récemment apprises et des événements récents, leur stockage et leur restitution (par exemple : la visite d'un proche ou bien la prise de médicament). Les troubles de la mémoire épisodique surviennent de manière très précoce dans l'évolution de la maladie d'Alzheimer.

La mémoire sémantique est définie par « un stock permanent de connaissances du monde servant de base à l'utilisation du langage, l'attribution du sens et l'interprétation des expériences sensorielles » [Tulving, 1995] (par exemple : l'histoire, la géographie, la signification des mots, la connaissance des coutumes, etc.). La maladie d'Alzheimer ne se caractérise que dans un second temps par un déficit de la mémoire sémantique [Farage et al., 2012]. Les troubles s'aggravent au fur et à mesure de la progression de la maladie.

Déficits cognitifs : les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer présentent un déficit cognitif (déficit intellectuel) par rapport à leurs capacités antérieures, et ce, dans un certain nombre de fonctions cognitives [Riley-Doucet et Debnath, 2007] [Gowans et al., 2007] [Rialle, 2007] [Moutinho, 2011] [Friedman et Bryen, 2012] [Ancient et Good, 2013]. Les fonctions cognitives recouvrent l'intelligence, la rapidité de traitement de l'information, la capacité à apprendre, le raisonnement, le jugement, l'attention, la capacité à résoudre le problème et la concentration.

Troubles psychologiques et comportementaux : les troubles psychologiques et comportementaux tiennent une place très importante dans la symptomatologie de la maladie d'Alzheimer [Rialle, 2007] [Moutinho, 2011] [Niels et al., 2013]. En ce sens, une étude prouve que 64% des malades Alzheimer présentent au moins un trouble du comportement ou psychologique [Lapre, 2010]. De la même manière, une autre étude estime que les symptômes psychiatriques accompagnent le malade d'Alzheimer dans environ 90% du total des cas [Cummings, 2005]. Les troubles psychologiques renvoient à une large variété de troubles affectifs et émotionnels parmi lesquels figurent les hallucinations, les délires, la dépression,

les troubles de l'identification, l'exaltation de l'humeur et l'anxiété. Les principaux symptômes comportementaux rencontrés dans la maladie d'Alzheimer sont l'errance, l'agitation et la désinhibition. Toutefois, ces symptômes ne se manifestent pas de façon automatique chez tous les malades et peuvent survenir à différents stades de cette maladie. L'association nationale d'Alzheimer estime qu'environ 40% des patients touchés par cette maladie souffrent d'une dépression. Cependant, la dépression diminue dans les stades les plus avancés [Lopez et al., 2003]. L'anxiété touche environ 50% des malades d'Alzheimer et peut durer tout au long de la maladie ou bien être vécue de manière périodique [Kallen-Cantegreil, 2005]. Les symptômes d'anxiété peuvent se manifester de façon très précoce dès la prise de conscience des premiers troubles cliniques de cette maladie. Très souvent, les malades d'Alzheimer refusent les nouvelles technologies [IJsselsteijn et al., 2007] [Phiriyapokanon, 2011] et refusent de les apprendre [Loureiro et Rodrigues, 2014].

Aphasie ou les troubles du langage : l'aphasie est une perturbation pathologique du langage oral et écrit et un déclin de production du langage et des capacités de compréhension. Ces troubles surviennent de manière fréquente dans la maladie d'Alzheimer [Rialle, 2007] [Wang, 2010] [Moutinho, 2011] [Niels et al., 2013]. Selon [Barkat-Defradas et al., 2008], l'atteinte des capacités langagières touche entre 8 et 15% des malades dès les stades précoces. [Barkat-Defradas et al., 2008] décrivent trois phases d'évolution des troubles du langage dans cette maladie : (1) Dans le stade précoce, les troubles du langage concernent principalement le manque du mot, affectant l'expression spontanée sans entraîner des troubles dans la compréhension. Les aspects syntaxiques, phonétiques et phonologiques sont préservés. Des stratégies de compensation sont mises en place pour pallier au manque du mot, telles que les circonlocutions (utiliser plusieurs mots à la place d'un seul), l'utilisation de mots génériques et les paraphrasies (substituer un mot par un autre). (2) Au stade modéré, les troubles du langage s'aggravent entraînant des difficultés dans la compréhension du discours. Celle-ci est marquée par des incohérences narratives. (3) Au stade sévère, les troubles du langage sont majeurs. Le discours est appauvri sur le plan qualitatif et quantitatif, ce qui entraîne une quasi-impossibilité à communiquer. Des troubles spécifiques sont observés comme la palilalie (répétition incessante d'un même mot) et l'écholalie (répétition de phrases ou de mots prononcés par une personne). Les troubles de la compréhension deviennent majeurs.

2.4.1.2. Incapacités liées au processus normal du vieillissement

Les personnes âgées souffrent de plusieurs incapacités [Arch et Abou-Zhara, 2008]. Nous les classifions en six groupes : « **incapacités visuelles** », « **incapacités auditives** »,

« **apraxie ou incapacités motrices** », « **absence ou pauvres compétences en informatique** », « **absence ou pauvres compétences littéraires** » et « **incapacité vocale** ».

Incapacités visuelles : les troubles de la vision chez les personnes âgées se développent [Hunter et al., 2007] [IJsselsteijn et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Moutinho, 2011] [Jian et al., 2011] [Farage et al., 2012] [Jian, 2013] [Niels et al., 2013] [Williams et al., 2013] [Darvishy et Good, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] : la baisse de l'acuité visuelle [Lorenz et al., 2007] [Moutinho, 2011] [Ancient et Good, 2013] [Williams et al., 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014], une perte progressive du champ de la vision périphérique ou sur le côté [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Jian et al., 2011] [Farage et al., 2012] [Williams et al., 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014], des difficultés d'adaptation à l'obscurité [IJsselsteijn et al., 2007] [Williams et al., 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014], une vision floue de près [Farage et al., 2012] ; y compris l'écran de l'ordinateur [Arch et Abou-Zhara, 2008] et un déclin de la perception des couleurs [IJsselsteijn et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Farage et al., 2012] [Williams et al., 2013], plus précisément, ils ont des difficultés à différencier les couleurs peu contrastées [IJsselsteijn et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Phiriyapokanon, 2011]. L'association nationale de la maladie d'Alzheimer rapporte que plus de 60% des malades d'Alzheimer souffrent d'une baisse dans au moins une des capacités visuelles.

Incapacités auditives : très souvent, les personnes âgées présentent au moins une des incapacités auditives [Lorenz et al., 2007] [IJsselsteijn et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [Jian, 2013] [Niels et al., 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014]. Une étude estime qu'environ 40% des adultes de plus de 65 ans souffrent d'un déficit auditif [Caprani et al., 2012]. Une autre étude estime qu'à l'âge de 65 ans, environ 30% des femmes et 50% des hommes souffrent d'un déficit auditif [Williams et al., 2013]. Les adultes peuvent souffrir aussi du fait qu'ils peuvent entendre les gens parler, mais ils ne peuvent pas comprendre les mots [Farage et al., 2012]. Le plus souvent, ils ont du mal à comprendre le texte produit par la synthèse vocale [IJsselsteijn et al., 2007] et ont difficulté de suivre les longues phrases [Jian et al., 2011].

Apraxie ou incapacités motrices : l'apraxie correspond aux troubles du comportement gestuel. Elle renvoie à l'incapacité à effectuer des mouvements volontaires. Le plus souvent, le processus du vieillissement s'accompagne d'une baisse de la mobilité [IJsselsteijn et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Jian et al., 2011] [Moutinho, 2011] [Niels et al., 2013] [Williams et al., 2013] [Darvishy et Good, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014]. Les

personnes âgées souffrent d'un manque de dextérité manuelle et ont souvent des difficultés à utiliser la souris et le clavier [IJsselsteijn et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Jian et al., 2011] [Williams et al., 2013]. Par exemple, il est difficile pour eux de pointer avec la souris si la cible est très petite [Jian et al., 2011] [Williams et al., 2013], appuyer sur plusieurs touches du clavier en même temps, contrôler les mouvements très fins [Jian et al., 2011] et maintenir un mouvement continu [IJsselsteijn et al., 2007]. Par la suite, plusieurs erreurs peuvent être produites pendant ces mouvements [Jian, 2013] [Williams et al., 2013].

Absence ou pauvres compétences en informatique : selon [IJsselsteijn et al., 2007], [Lorenz et al., 2007] et [Phiriyapokanon, 2011], la plupart des personnes âgées ne maîtrisent pas l'utilisation des nouvelles technologies. Par exemple, selon une étude en France, 59% des personnes de plus de 70 ans possèdent un téléphone mobile, mais seulement 5% possèdent un smartphone [Weenect, 2017].

Absence ou pauvres compétences littéraires : en France, selon une enquête réalisée en 2011, l'illettrisme touche environ 75 000 personnes âgées de 56 à 65 ans [Agence nationale de la lutte contre l'illettrisme, 2013]. L'illettrisme touche davantage les personnes âgées de plus de 65 ans. En Tunisie, le taux d'illettrisme des adultes est important. Il est estimé à 70,2% des personnes âgées de 65 ans et plus en 2015 [Atlas mondial de données, 2018].

Incapacité vocale : la voix des personnes âgées est inéluctablement modifiée [Jian et al., 2011] [Jian, 2013]. Les personnes âgées ont des difficultés en prononçant les mots complexes. Par conséquent, la saisie des données en utilisant la modalité de la reconnaissance vocale peut être limitée par ces tremblements de voix. Les personnes âgées ont besoin de plus de temps pour produire les mots [Jian et al., 2011].

2.4.2. Sélection des travaux

Nous sélectionnons, à partir de la littérature, 16 travaux qui présentent un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs. Un seul travail cible les **personnes porteuses de handicap**. Neuf travaux ciblent les **personnes âgées**. Deux travaux ciblent les **personnes ayant une démence**. Deux travaux ciblent les **personnes atteintes de dyslexie** et deux travaux ciblent les **adultes atteints de l'aphasie**. Le Tableau 1 résume notre sélection des travaux.

Tableau 1. Notre sélection de travaux présentant un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie.

Travail	Utilisateur cible	Interface utilisateur cible
Les règles Web Content Accessibility Guidelines (WCAG 2.0)	Les personnes porteuses de handicap	Les interfaces utilisateurs web
[Zaphiris et al., 2005]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs web
[Ijsselstein et al., 2007]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs pour les jeux
[Arch et Abou-Zhara, 2008]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs web
[Jian et al., 2011]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs multimodales
[Al-Razgan et al., 2012]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs mobiles
[Farage et al., 2012]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs pour les sites web et les applications
[Darvishy et Good, 2013]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs web
[Williams et al., 2013]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs pour les sites web et les applications
[Loureiro et Rodrigues, 2014]	Les personnes âgées	Les interfaces utilisateurs tactiles
[Moutinho, 2011]	Les personnes ayant une démence	Les interfaces utilisateurs mobiles
[Friedman et Bryan, 2012]	Les personnes ayant une démence	Les interfaces utilisateurs web
[De Santana et al., 2012]	Les personnes atteintes de la dyslexie	Les interfaces utilisateurs web
[Rello et al., 2012]	Les personnes atteintes de la dyslexie	Les interfaces utilisateurs web
[Daemen et al., 2007]	Les personnes atteintes de l'aphasie	Une application logicielle de narration
[Kane et Galbraith, 2013]	Les personnes atteintes de l'aphasie	Une technologie de vote

2.4.2.1. Accessibilité aux personnes porteuses de handicap

Les règles du Web Content Accessibility Guidelines (WCAG 2.0)⁷ sont publiées par le Web Accessibility Initiative (WAI)⁸ en décembre 2008. WCAG 2.0 fait l'objet de la norme

⁷ WCAG 2.0. URL: <https://www.w3.org/Translations/WCAG20-de/> (consultée pour la dernière fois le 01/10/2017).

⁸ WAI est un groupe de travail du W3C, lancé en 1997, qui est en charge de proposer des solutions pour rendre le Web accessible, principalement aux personnes handicapées.

internationale ISO/IEC 40500⁹. WCAG 2.0 représente un ensemble de directives d'ergonomie qui s'appliquent autant pour les sites que pour les applications web. Cependant, elles sont critiquées pour être principalement axées sur les besoins des personnes souffrant de handicaps sensoriels et physiques, et pour prendre insuffisamment en compte les besoins des personnes ayant des déficiences cognitives [Seeman et Cooper, 2015] [Waight et Oldreive, 2015]. WCAG 2.0 se compose de treize directives d'ergonomie regroupées en quatre catégories :

- Le contenu doit être assez robuste pour fonctionner avec les technologies actuelles et à venir ;
- Le contenu et les commandes doivent être compréhensibles ;
- Les éléments de l'interface doivent être utilisables ;
- Le contenu doit être perceptible.

2.4.2.2. Accessibilité aux personnes âgées

Nous sélectionnons neuf travaux sur l'accessibilité des interfaces utilisateurs aux personnes âgées. Nous catégorisons ces derniers en travaux ciblant les interfaces utilisateurs pour le web ([Zaphiris et al., 2005], [Arch et Abou-Zhara, 2008] et [Darvishy et Good, 2013]), les interfaces utilisateurs mobiles ([Al-Razgan et al., 2012]), les interfaces utilisateurs tactiles ([Loureiro et Rodrigues, 2014]), les interfaces utilisateurs multimodales ([Jian et al., 2011]), les interfaces utilisateurs pour les jeux ([Ijsselsteijn et al., 2007]) et les interfaces utilisateurs pour les sites web et les applications ([Farage et al., 2012] et [Williams et al., 2013]).

Zaphiris et al. identifient trente-huit bonnes pratiques d'ergonomie regroupées en onze catégories : « conception de la cible », « utilisation des graphiques », « navigation », « fonctionnalités de la fenêtre du navigateur », « conception de la mise en page du contenu », « liens », « utilisation des couleurs et des arrière-plans », « conception du texte », « moteur de recherche », « feedback et support » et “user cognitive design”.

Arch et Abou-Zhara résument les principales incapacités physiques liées à l'âge, en particulier « les incapacités visuelles », « les déficits auditifs », « les incapacités motrices » et « les déficits cognitifs ». Ensuite, ils suggèrent des bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception de sites et d'applications web.

⁹ Technologies de l'information -- Règles pour l'accessibilité des contenus Web (WCAG) 2.0 [Organisation Internationale de Normalisation, 2012]

Darvisy et Good présentent huit domaines d'orientation pour l'évaluation de l'accessibilité des pages web pour les personnes âgées : « clarté et structure », « navigation », « recherche », « texte et langage utilisé », « actualité, cohérence et robustesse », « informations de contact et support », « inscription et formulaire » et « graphisme, animation et multimédia ». Pour chacun de ces domaines, les auteurs définissent une liste de points d'évaluation.

Al-Razgan et al. proposent un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des téléphones pour les personnes âgées. Ces dernières sont regroupées en « regarder et sentir », « interaction » et « fonctionnalité ».

Loureiro et Rodrigues proposent 113 bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir les interfaces utilisateurs tactiles pour les personnes âgées. Les auteurs regroupent ces dernières en dix critères d'ergonomie : « conception de la cible », « représentation du texte », « audio », « utilisation des graphiques », « navigation et erreur », « conception de la disposition du contenu », « user cognitive design », « interactions tactiles », « feedback et support » et « évaluation de l'interface utilisateur ».

Jian et al. résument les principales incapacités liées à l'âge, en particulier « les incapacités visuelles », « les troubles du langage », « les incapacités auditives », « les incapacités motrices », « les troubles d'attention », « les troubles mnésiques » et « les déficits intellectuels ». Ensuite, ils proposent un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir des interfaces utilisateurs multimodales pour les personnes âgées. Ces dernières sont regroupées selon les incapacités cliniques identifiées.

IJsselsteijn et al. identifient les principales incapacités cliniques liées à l'âge : « les incapacités sensorielles », « les déficits cognitifs » et « les incapacités motrices ». Pour chacune de ces dernières, ils proposent un nombre de bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir les interfaces utilisateurs des jeux pour les utilisateurs âgés.

Farage et al. résument les principales incapacités liées à l'âge : « les incapacités visuelles », « les incapacités auditives », « l'apraxie », « les troubles de la mémoire » et « les déficits cognitifs ». Pour chacune de ces dernières, ils suggèrent des bonnes pratiques d'ergonomie pour concevoir les interfaces utilisateurs des sites web et des applications.

Williams et al. identifient les obstacles auxquels sont confrontés les personnes âgées lorsqu'ils utilisent un ordinateur. Ces obstacles sont catégorisés en « troubles cognitifs »,

« troubles auditifs », « troubles haptiques », « troubles visuels » et « troubles moteurs ». Ensuite, ils proposent un ensemble de solutions pour les problèmes identifiés.

2.4.2.3. Accessibilité aux personnes atteintes de démence

Nous identifions deux travaux ([Moutinho, 2011] et [Friedman et Bryan, 2012]) sur l'accessibilité des interfaces utilisateurs aux personnes souffrant d'une démence.

Moutinho propose un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs mobiles accessibles aux personnes atteintes d'une démence. Elles sont classifiées en six catégories : « personnalisation », « feedback », « modalités », « prévention aux erreurs », « entrées » et « connectivité ».

Friedman et Bryan proposent un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception de sites web accessibles aux personnes atteintes d'une démence. Ces dernières couvrent les incapacités suivantes : « retard mental ou déficiences intellectuelles », « troubles d'apprentissage », « dyslexie » et « aphasie ».

2.4.2.4. Accessibilité aux personnes dyslexiques

Nous identifions deux travaux ([De Santana et al., 2012] et [Rello et al., 2012]) qui se focalisent sur l'accessibilité des interfaces utilisateurs aux personnes atteintes de la dyslexie.

De Santana et al. proposent quarante et une bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception de sites web accessibles aux personnes atteintes de la dyslexie. Les auteurs regroupent ces dernières en neuf catégories : « navigation », « couleurs », « présentation du texte », « écrit », « panneau », « images et graphiques », « personnalisation », « balisage » et « vidéos et audio ».

Rello et al. présentent un ensemble de bonnes pratiques de conception qui visent à favoriser l'accessibilité des textes affichés dans les pages web pour les personnes dyslexiques. Ces dernières sont basées sur les résultats quantitatifs et qualitatifs recueillis à partir d'un ensemble d'études expérimentales réalisées avec l'utilisateur cible. Les auteurs regroupent ces bonnes pratiques d'ergonomie en « arrière-plan », « couleurs », « taille du texte », « caractère », « espacement entre les lignes et les paragraphes » et « largeur des colonnes ».

2.4.2.5. Accessibilité aux personnes aphasiques

Nous identifions deux travaux ([Daemen et al., 2007] et [Kane et Galbraith, 2013]) sur l'accessibilité des interfaces utilisateurs aux personnes aphasiques.

Daemen et al. présentent la conception et l'évaluation d'une application logicielle de narration pour les personnes aphasiques. Ils présentent un ensemble de bonnes pratiques d'ergonomie. Ces dernières sont classées en trois catégories : « simplicité », « structure et mise en page » et « utilisation de la technologie ».

Kane et Galbraith énumèrent sept bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception d'une technologie de vote pour les adultes souffrant de l'aphasie et d'autres troubles liés à la communication.

2.4.3. Bonnes pratiques d'ergonomie

Dans la présente section, nous présentons **notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie que les concepteurs pourront suivre pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer**, comme le montre le Tableau 2. Nous classifions les bonnes pratiques d'ergonomie selon les incapacités identifiées dans la section 2.4.1. Par la suite, dix groupes sont créés. Nous effectuons un second processus de classification. Nous proposons les neuf critères d'ergonomie suivants : « **feedback et support** », « **navigation** », « **contenu textuel et pictural** », « **éléments visuels** », « **interactions tactiles** », « **audio** », « **personnalisation** », « **hardware** » et « **entrées** » (**ordre**). Ces critères sont proposés en s'inspirant des travaux suivants : [Zaphiris et al., 2005], [Darvishy et Good, 2013] et [Loureiro et Rodrigues, 2014].

Tableau 2. Notre guide de 145 bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs pour les malades d'Alzheimer.

G1. Troubles mnésiques	
Feedback et support	<p>[G1. 1] - Fournir un feedback après chaque action de l'utilisateur [Moutinho, 2011] [Friedman et Bryen, 2012] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G1. 2] - Utiliser des messages courts ;</p> <p>[G1. 3] - S'assurer de la cohérence des feedbacks [Moutinho, 2011] ;</p> <p>[G1. 4] - Assister l'utilisateur durant sa navigation (par exemple : via un arrière-plan sonore) ;</p> <p>[G1. 5] - Fournir un tutoriel d'aide [Zaphiris et al., 2005] ;</p> <p>[G1. 6] - Fournir des rappels basés sur des événements [Farage et al., 2012] ;</p>
Navigation	<p>[G1. 7] - S'assurer de la cohérence des éléments nécessaires à la navigation (par exemple : les polices, les couleurs et les tailles doivent être similaires ; le menu de boutons doit être dans le même endroit dans toutes les interfaces utilisateurs ; utiliser les</p>

	<p>mêmes symboles et les mêmes icônes dans toutes les interfaces utilisateurs du site web ou de l'application ; les hyperliens doivent être cohérents) [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G1. 8] - Différencier entre les hyperliens visités et ceux non visités [Zaphiris et al., 2005] [de Santana et al., 2012] ; Changer la couleur des hyperliens visités ;</p>
Contenu textuel et pictural	<p>[G1. 9] - Fournir des phrases courtes [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G1. 10] - Fournir des petits paragraphes [de Santana et al., 2012] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p>
G2. Déficiats cognitifs	
Contenu textuel et pictural	<p>[G2. 1] - S'assurer que le contenu textuel est simple et facile à comprendre [Zaphiris et al., 2005] [IJsselsteijn et al., 2007] [Daemen et al., , 2007] [Moutinho, 2011] [Jian et al., 2011] [de Santana et al., 2012] [Friedman et Bryen, 2012] [Farage et al., 2012] [Darvishy et Good, 2013] [Kane et Galbraith, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 2] - Éviter les abréviations et les symboles [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 3] - Utiliser la forme active et éviter la forme passive [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G2. 4] - Éviter la double négation [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G2. 5] - Ne pas diviser un mot à la fin de la phrase [Friedman et Bryen, 2012] ;</p> <p>[G2. 6] - Fournir des exemples [Friedman et Bryen, 2012] ;</p> <p>[G2. 7] - S'assurer qu'il n'y a pas des fautes de grammaire et d'orthographe [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 8] - Catégoriser sémantiquement le contenu textuel en petites sections [Kane et Galbraith, 2013] [Darvishy et Good, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 9] - Exprimer une seule idée par paragraphe ;</p> <p>[G2. 10] - Ajouter une table des matières pour les longs contenus textuels [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 11] - Donner un titre à chaque page et frame [Friedman et Bryen, 2012] ;</p> <p>[G2. 12] - Surligner les mots-clés [Zaphiris et al., 2005] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 13] - Fournir le moins possible de choix à l'utilisateur [Zaphiris et al., 2005] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G2. 14] - Présenter le contenu textuel en utilisant plusieurs supports multimédias, (par exemple : texte, vidéo, image, audio) [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [Abou-Zahra, 2012] [de Santana et al., 2012] [Kane et Galbraith, 2013] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 15] - Présenter le contenu textuel en utilisant plusieurs modalités [IJsselsteijn et al., 2007] [Moutinho, 2011] ;</p> <p>[G2. 16] - Dans la mesure du possible, présenter les contenus numériques en utilisant</p>

	<p>les graphiques [Kane et Galbraith, 2013] ;</p> <p>[G2. 17] - Utiliser des icônes et des images représentatives, explicites et faciles à comprendre [Zaphiris et al., 2005] [IJsselsteijn et al., 2007] [Daemen et al., , 2007] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 18] - Attribuer aux images et aux icônes un texte alternative (l'attribut alt) [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [Abou-Zahra, 2012] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G2. 19] - Attribuer aux images et icônes une description textuelle significative [Jian et al., 2011] [Al-Razgan et al., 2012] [Abou-Zahra, 2012] ;</p> <p>[G2. 20] - Laisser à l'utilisateur suffisamment du temps pour lire et utiliser le contenu présenté [Zaphiris et al., 2005] ;</p>
<p>Eléments visuels</p>	<p>[G2. 21] - Surligner les informations importantes en utilisant les cadres [Friedman et Bryen, 2012] ;</p> <p>[G2. 22] - Utiliser les majuscules pour surligner les mots-clés ;</p> <p>[G2. 23] - Afficher les informations importantes au milieu de l'interface utilisateur [Zaphiris et al., 2005] [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G2. 24] - Ajouter un espace entre les paragraphes pour les séparer visuellement [Rello et al., 2012] (Ajouter une ligne entre les paragraphes pour les séparer visuellement [de Santana et al., 2012]) ;</p> <p>[G2. 25] - Souligner seulement les hyperliens pour les distinguer visuellement du reste du contenu textuel [de Santana et al., 2012] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 26] - Utiliser différentes couleurs pour organiser visuellement le contenu textuel [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G2. 27] - Placer la zone de recherche en haut à droite ou en haut à gauche de l'interface utilisateur ;</p> <p>[G2. 28] - Offrir une conception simple [IJsselsteijn et al., 2007] [Daemen et al., , 2007] [Friedman et Bryen, 2012] [Farage et al., 2012] [de Santana et al., 2012] [Williams et al., 2013] ;</p> <p>[G2. 29] - Diviser le panneau de l'interface utilisateur aussi simple que possible [Daemen et al., 2007] [Jian et al., 2011] ;</p> <p>[G2. 30] - Afficher seulement les informations importantes [Zaphiris et al., 2005] [IJsselsteijn et al., 2007] [Farage et al., 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 31] - Éviter l'utilisation de plusieurs couleurs [Daemen et al., 2007] [Jian et al., 2011] ;</p> <p>[G2. 32] - Éviter l'utilisation de plusieurs images ;</p> <p>[G2. 33] - Éviter la décoration inutile [Moutinho, 2011] ;</p> <p>[G2. 34] - Éviter les détails ;</p> <p>[G2. 35] - Ne pas utiliser les images pour un objectif de décoration [Zaphiris et al.,</p>

	<p>2005] [Jian et al., 2011] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G2. 36] - Éviter les animations [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G2. 37] - Ajouter une animation simple et lente uniquement si nécessaire ;</p> <p>[G2. 38] - Éviter des éléments inutiles qui attirent l'attention (par exemple : les bannières publicitaires, etc.) [Jian et al., 2011] [Farage et al., 2012] [Darvishy et Good, 2013] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 39] - Limiter le nombre des polices utilisées [Friedman et Bryen, 2012] ;</p> <p>[G2. 40] - Présenter un seul message à la fois [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p>
Navigation	<p>[G2. 41] - Éviter les hiérarchies profondes [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G2. 42] - Utiliser les listes à puces pour énumérer les hyperliens [Zaphiris et al., 2005] ;</p> <p>[G2. 43] - Nommer les liens d'une manière non ambiguë [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Friedman et Bryen, 2012] (par exemple : ne pas utiliser « Cliquez ici » [de Santana et al., 2012]) ;</p> <p>[G2. 44] - Fournir un maximum de 6 boutons dans le menu [Friedman et Bryen, 2012] ;</p>
Feedback et support	<p>[G2. 45] - Fournir des messages d'erreur permettant d'aider l'utilisateur à résoudre le problème rencontré [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G2. 46] - Demander la confirmation avant chaque instruction critique [Moutinho, 2011] ;</p> <p>[G2. 47] - S'assurer que les actions sont simples [Daemen et al., 2007] [Kane et Galbraith, 2013] ;</p>
Interactions tactiles	<p>[G2. 48] - S'assurer que l'écran n'est pas éteint lorsqu'il est inactif [Al-Razgan et al., 2012] ;</p> <p>[G2. 49] - Fournir un clavier qui sépare les chiffres et les lettres [Al-Razgan et al., 2012] ;</p>
Audio	<p>[G2. 50] - Éviter les fonds musicaux [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p>
G3. Troubles psychologiques et comportementaux	
Contenu textuel et pictural	<p>[G3. 1] - Utiliser un vocabulaire en ligne avec le champ sémantique des adultes ;</p> <p>[G3. 2] - Utiliser des images de personnes âgées ou des choses anciennes ;</p> <p>[G3. 3] - Ajouter de l'humour (par exemple : émoticônes drôles) ;</p>
Feedback et Support	<p>[G3. 4] - S'assurer que les messages d'erreur indiquent clairement à l'utilisateur qu'il n'est pas la cause de l'erreur [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G3. 5] - Utiliser des feedbacks qui ne sont pas en commando-style ;</p> <p>[G3. 6] - Fournir des messages encourageants [IJsselsteijn et al., 2007] ;</p>
G4. Aphasie ou troubles du langage	
Entrées	<p>[G4. 1] - Utiliser, si possible, les listes à choix multiples au lieu des champs de texte pour la saisie des données [Moutinho, 2011] [Friedman et Bryen, 2012] ;</p>
G5. Incapacités visuelles	

<p>Eléments visuels</p>	<p style="text-align: center;">/*Les images et les icônes*/</p> <p>[G5. 1] - Utiliser des images et des icônes de grande taille [Daemen et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p style="text-align: center;">/*La représentation du texte*/</p> <p>[G5. 2] - Fournir un contenu textuel lisible [Daemen et al., , 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Jian et al., 2011] [Al-Razgan et al., 2012] [Farage et al., 2012] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] (au minimum 12-pt jusqu'à 14-pt pour le texte affiché et 16-pt pour les titres [Zaphiris et al., 2005] [Jian et al., 2011] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Rello et al., 2012]) ;</p> <p>[G5. 3] - Éviter les polices d'écriture décoratives [Zaphiris et al., 2005] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G5. 4] - Utiliser une police de caractères dont les lettres sont faciles à lire (par exemple : le Sans-Serif) [Zaphiris et al., 2005] [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Kane et Galbraith, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G5. 5] - Utiliser le caractère moyen ;</p> <p>[G5. 6] - Éviter le texte justifié [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 7] - Aligner le texte à gauche [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G5. 8] - Éviter l'utilisation du texte en italique, du texte souligné et du texte en gras pour les gros blocs de texte [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 9] - Utiliser les caractères en gras uniquement pour surligner les mots-clés et les titres ;</p> <p>[G5. 10] - Utiliser les lettres en minuscules pour écrire le contenu textuel [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 11] - Éviter l'utilisation de l'effet de l'ombre ;</p> <p>[G5. 12] - Utiliser un interlignage d'au moins 1,5 [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G5. 13] - Utiliser des espaces blancs [de Santana et al., 2012] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G5. 14] - S'assurer que la taille du texte pour l'impression est entre 12 pt et 14 pt [Farage et al., 2012] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 15] - Évitez les longues lignes de texte (environ 70 caractères par ligne) [Friedman et Bryen, 2012] [Rello et al., 2012] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G5. 16] - Fournir une distance plus grande entre les mots [Rello et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 17] - Évitez les petites colonnes [Rello et al., 2012] ;</p> <p style="text-align: center;">/*Les couleurs*/</p>
--------------------------------	--

	<p>[G5. 18] - Utiliser des couleurs froides [Farage et al., 2012] [Friedman et Bryen, 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G5. 19] - Éviter les couleurs fluorescentes [Arch et Abou-Zhara, 2008] ;</p> <p>[G5. 20] - Éviter les couleurs saturées, complémentaires (jaune et bleu ou rouge et vert) ou éloignées dans le spectre des couleurs (jaune et pourpre) qui peuvent causer des images consécutives, des ombres et des effets de profondeur [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G5. 21] - Maximiser le contraste entre la couleur de l'arrière-plan et la couleur du texte [Zaphiris et al., 2005] [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] [de Santana et al., 2012] [Rello et al., 2012] [Friedman et Bryen, 2012] [Abou-Zahra, 2012] [Kane et Galbraith, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G5. 22] - Éviter l'utilisation de deux couleurs ayant des éclairages similaires proches l'un de l'autre ;</p> <p>[G5. 23] - Maximiser le contraste entre les informations pertinentes et les autres informations affichées [Moutinho, 2011] [Jian et al., 2011] ;</p> <p>[G5. 24] - Éviter un arrière-plan en mosaïque [Farage et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 25] - Éviter les images de fond en arrière-plan [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 26] - Éviter un arrière-plan tout blanc [Zaphiris et al., 2005] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 27] - Éviter un arrière-plan foncé ;</p> <p>[G5. 28] - Éviter de combiner une couleur du texte noir et un arrière-plan blanc [Rello et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 29] - Éviter le vert et le bleu [Zaphiris et al., 2005] ;</p>
Navigation	<p>[G5. 30] - Éviter les menus transparents [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G5. 31] - Évitez les hiérarchies profondes : la profondeur de la navigation doit être limitée à deux ou trois niveaux [Daemen et al., 2007] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G5. 32] - Utiliser des boutons de grande taille [Arch et Abou-Zhara, 2008] ;</p> <p>[G5. 33] - Placer les hyperliens uniquement au début ou à la fin de la phrase [de Santana et al., 2012] ;</p>
Personnalisation	<p>[G5. 34] - Permettre aux utilisateurs d'ajuster les couleurs (les couleurs de fond, les couleurs du texte et les couleurs d'impression) et la taille du texte à leurs volontés [IJsselsteijn et al., 2007] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G5. 35] - Permettre aux utilisateurs d'ajuster le contraste ;</p> <p>[G5. 36] - Permettre aux utilisateurs de faire des zooms [IJsselsteijn et al., 2007] ;</p>
Audio	[G5. 37] - Ajouter un arrière-plan sonore pour présenter les informations ;
Hardware	[G5. 38] - Éviter l'utilisation des appareils à petits écrans ;
G6. Incapacités auditives	
Audio	[G6. 1] - Augmenter, par défaut, le volume de l'arrière-plan sonore [Farage et al.,

	<p>2012] ;</p> <p>[G6. 2] - Allonger la durée des bips sonores [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G6. 3] - Utiliser une voix masculine pour délivrer le contenu auditif [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G6. 4] - Faire recours au discours naturel et non au discours synthétisé pour délivrer le contenu auditif [IJsselsteijn et al., 2007] [Farage et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G6. 5] - Réduire la vitesse de l'arrière-plan sonore [Moutinho, 2011] ;</p> <p>[G6. 6] - Le message auditif doit être prononcé lentement. Il faut faire une pause de quelques secondes après chaque phrase [Moutinho, 2011] [Farage et al., 2012] ;</p> <p>[G6. 7] - Fournir une alternative textuelle équivalente du contenu auditif [Moutinho, 2011] ;</p>
Personnalisation	<p>[G6. 8] - Permettre aux utilisateurs d'arrêter l'arrière-plan sonore [Kane et Galbraith, 2013] ;</p> <p>[G6. 9] - Permettre aux utilisateurs de réécouter les messages auditifs [Kane et Galbraith, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G6. 10] - Permettre aux utilisateurs d'ajuster le volume [Farage et al., 2012] [Friedman et Bryen, 2012] [Abou-Zahra, 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p> <p>[G6. 11] - Permettre aux utilisateurs d'ajuster la vitesse des messages auditifs [Kane et Galbraith, 2013] ;</p>
Eléments visuels	<p>[G6. 12] - Placer le bouton du réglage du volume dans un emplacement facile à repérer [Williams et al., 2013] ;</p>
G7. Apraxie ou incapacités motrices	
Navigation	<p>[G7. 1] - Utiliser les menus statiques et éviter les menus déroulants [Zaphiris et al., 2005] [Arch et Abou-Zhara, 2008] [de Santana et al., 2012] ;</p> <p>[G7. 2] - Utiliser un menu avec un support audio ;</p> <p>[G7. 3] - Éviter les barres de défilement [Zaphiris et al., 2005] [IJsselsteijn et al., 2007] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ;</p> <p>[G7. 4] - Minimiser le nombre de clics de souris nécessaires pour effectuer une action donnée ;</p> <p>[G7. 5] - Utiliser un simple clic de souris [Zaphiris et al., 2005] [Arch et Abou-Zhara, 2008] ;</p> <p>[G7. 6] - Éviter l'utilisation des mouvements difficiles (par exemple : le glissement) [Jian et al., 2011] ;</p>
Entrées	<p>[G7. 7] - Offrir une solution facile pour saisir les caractères qui nécessitent l'appui de deux touches en même temps telles que « @ » et « € » ;</p>
Eléments visuels	<p>[G7. 8] - Augmenter la distance de la zone qui entoure l'hyperlien ;</p> <p>[G7. 9] - Ajouter un curseur pour montrer l'information sélectionnée [Loureiro et Rodrigues, 2014] ;</p>

Hardware	[G7. 10] - Utiliser les écrans tactiles [Daemen et al., 2007] [Jian et al., 2011] ; [G7. 11] - Éviter les claviers séparés [Al-Razgan et al., 2012] ;
Interactions tactiles	[G7. 12] - Laisser une distance plus large entre les boutons [Al-Razgan et al., 2012] ;
G8. Absence ou pauvres compétences en informatique	
Navigation	[G8. 1] - Fournir le plan du site [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] ; [G8. 2] - Indiquer à l'utilisateur le trajet de la navigation déjà effectué, sa position actuelle et les trajets futurs possibles [Zaphiris et al., 2005] [Darvishy et Good, 2013] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ; [G8. 3] - Ajouter le menu dans toutes les interfaces utilisateurs de l'application ou du site web [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] ; [G8. 4] - Fournir l'hyperlien « précédent » pour aider l'utilisateur s'il est perdu [Jian et al., 2011] [Friedman et Bryen, 2012] ;
G9. Absence ou pauvres compétences littéraires	
Contenu textuel et pictural	[G9. 1] - Faire recours aux images et à un arrière-plan sonore lorsque l'utilisateur ne peut pas lire le contenu textuel présenté [IJsselsteijn et al., 2007] [Moutinho, 2011] [Friedman et Bryen, 2012] [Farage et al., 2012] [de Santana et al., 2012] ; [G9. 2] - Ajouter une vidéo pour mieux expliquer le contenu textuel [Friedman et Bryen, 2012] ; [G9. 3] - Éviter l'utilisation des chiffres romains [Friedman et Bryen, 2012] ;
Entrées	[G9. 4] - Ajouter un correcteur d'orthographe pour les zones de saisie et de recherche [Zaphiris et al., 2005] [Friedman et Bryen, 2012] [de Santana et al., 2012] [Loureiro et Rodrigues, 2014] [Seeman et Cooper, 2015] ; [G9. 5] - Minimiser l'utilisation du clavier pour la saisie des données [Jian et al., 2011] ; [G9. 6] - Alimenter l'application automatiquement autant que possible [Moutinho, 2011] ; [G9. 7] - Offrir la modalité de la reconnaissance vocale pour la saisie des données, tout en gardant l'alternative de la saisie en utilisant le clavier ;
Navigation	[G9. 8] - Identifier les boutons par des icônes étiquetées [de Santana et al., 2012] ;
G10. Incapacité vocale	
Entrées	[G10. 1] - Utiliser des microphones dédiés aux personnes âgées pour la saisie des données via la modalité de la reconnaissance vocale [Jian et al., 2011].

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons **notre étude ergonomique qui vise à assurer l'accessibilité des interfaces utilisateurs aux malades d'Alzheimer**. En effet, cet utilisateur particulier souffre de plusieurs incapacités qui l'empêchent d'utiliser les interfaces utilisateurs standards.

À notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature une méthodologie de conception et un guide de bonnes pratiques d'ergonomie que les concepteurs suivent pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer. C'est pour cela que nous proposons **notre méthodologie de conception InterfaceToAlz, centrée utilisateur, itérative, et formée par trois phases** (guide de bonnes pratiques d'ergonomie, conception des interfaces utilisateurs selon le guide proposé et évaluation de ces interfaces). Cette méthodologie est généralisable à d'autres types d'utilisateurs et à d'autres types d'interfaces utilisateurs. Ensuite, nous nous basons sur cette méthodologie pour proposer **un guide de bonnes pratiques d'ergonomie pour la conception des interfaces utilisateurs accessibles à notre cible**. D'abord, nous identifions les principales incapacités relatives aux malades d'Alzheimer. Nous classifions ces dernières en (1) incapacités liées à la maladie d'Alzheimer (« troubles mnésiques », « déficits cognitifs », « troubles psychologiques et comportementaux » et « aphasie ou troubles du langage ») et (2) incapacités liées au processus normal du vieillissement (« incapacités visuelles », « incapacités auditives », « apraxie ou incapacités motrices », « absence ou pauvres compétences en informatique », « absence ou pauvres compétences littéraires » et « incapacité vocale »). Puis, nous sélectionnons, à partir de la littérature, seize travaux qui se focalisent sur la conception des interfaces utilisateurs pour les personnes handicapées, les personnes âgées, les personnes ayant une démence, les personnes dyslexiques et les adultes aphasiques. Ensuite, nous collectons à partir de ces travaux 145 bonnes pratiques d'ergonomie formant notre guide d'ergonomie. Enfin, nous classifions ces dernières selon les incapacités identifiées et les neuf critères d'ergonomie suivants : « contenu textuel et pictural », « feedback et support », « navigation », « éléments visuels », « interactions tactiles », « audio », « personnalisation », « hardware » et « entrées ».

Notons que dans le septième chapitre, nous suivons notre méthodologie InterfaceToAlz pour la conception des interfaces utilisateurs du prototype de CAPTAIN MEMO et nous évaluerons leur accessibilité avec des malades d'Alzheimer.

Dans le prochain chapitre (chapitre 4), nous présentons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph. Ce dernier fait appel à notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie, pour assurer l'accessibilité de la visualisation générée aux malades d'Alzheimer.

CHAPITRE 3 :

Memo Graph : Visualisation

d'ontologies accessible aux malades

d'Alzheimer

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous **présentons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph. Il génère un graphe accessible aux malades d'Alzheimer.**

Dans le cadre de CAPTAIN MEMO, nous avons besoin de générer le graphe de la famille et de l'entourage du patient d'Alzheimer, à partir de sa base de connaissances structurée selon l'ontologie MemoFuzzyOnto. Par conséquent, il est nécessaire d'intégrer dans le prototype de CAPTAIN MEMO un outil de visualisation d'ontologies ayant la particularité d'être accessible aux malades d'Alzheimer.

L'état de l'art montre que les outils de visualisation d'ontologies existants **ne prennent pas en compte des problèmes liés à l'accessibilité** de la visualisation générée. Ce problème est critique, car notre utilisateur est un malade d'Alzheimer. Très peu d'outils visent les utilisateurs non-connaisseurs du domaine. Cependant, ils **ne sont pas conçus pour être utilisés par des malades d'Alzheimer**. En conclusion, **à notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature un outil qui offre une visualisation d'ontologies accessible aux non-connaisseurs du domaine et souffrant de la maladie d'Alzheimer**. Dans ce chapitre, nous présentons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph qui génère un graphe accessible à cet utilisateur particulier.

Pour assurer l'accessibilité de la visualisation générée avec Memo Graph, nous nous basons sur **notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie** pour la conception des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer, présenté dans le second chapitre.

Le résumé de l'ontologie facilite sa compréhension [Troullinou et al., 2017]. Pour assurer la lisibilité et la compréhensibilité de la visualisation générée à l'aide de Memo Graph, nous nous basons sur notre approche, appelée **Incremental Key-Instances Extraction and Visualisation (IKIEV)**. Elle permet une **extraction et une visualisation incrémentale du résumé de l'ABox de l'ontologie** (un ensemble d'instances-clés ou descripteurs qui la décrit le mieux et les propriétés associées). Memo Graph est proposé principalement pour être intégré dans le prototype de CAPTAIN MEMO afin de visualiser un ensemble de données structurées selon l'ontologie MemoFuzzyOnto. C'est pour cela que notre approche IKIEV est limitée à l'extraction et la visualisation du résumé de l'ABox et non du TBox.

Memo Graph est conçu principalement pour visualiser les ontologies. Il supporte aussi la **visualisation des données ouvertes liées**. Comme effets secondaires désirables, il peut être intégré dans d'autres applications pour les non-connaisseurs du domaine et il peut être utilisé en tant qu'application autonome par des experts du domaine pour la visualisation d'ontologies et des jeux de données ouvertes liées. Comme il est basé sur notre approche IKIEV, il supporte par la suite le **passage à l'échelle**.

La suite de ce chapitre est structurée comme suit. La section 3.2 présente l'état de l'art des domaines abordés dans ce chapitre, c'est-à-dire, l'ontologie, la visualisation de cette dernière et la visualisation des données liées. La section 3.3 présente notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph. La section 3.4 présente quelques utilisations de ce dernier et la section 3.5 présente son évaluation. Nous terminons, dans la section 3.6, par une conclusion et quelques perspectives.

3.2. État de l'art

Dans cette section, nous définissons la notion de l'ontologie. Puis, nous passons en revue les différents outils de visualisation d'ontologies et les différents outils de visualisation des données liées.

3.2.1. Notion de l'ontologie

Le besoin de représenter les données d'une manière à travers laquelle les machines peuvent manipuler la « **sémantique** » donne naissance aux ontologies. L'ontologie est un concept central du **web sémantique**. C'est pour cela que nous définissons tout d'abord le web sémantique. Puis, nous définissons l'ontologie. Enfin, nous précisons ses différents composants.

3.2.1.1. Web sémantique

Tim Berners-Lee, fondateur et président du Consortium World Wide Web¹⁰ (W3C), définit le web sémantique comme **une extension du web statique** dans laquelle les données ont un sens bien défini, permettant aux ordinateurs et aux utilisateurs de mieux travailler en coopération (homme-homme, homme-machine et machine-machine) [Berners-Lee et al., 2001]. Le W3C met en place les trois recommandations suivantes :

¹⁰ Le W3C est une organisation chargée de définir les standards pour les technologies du web.

- La description du web à travers des **ontologies compréhensibles par des humains et traitables par des machines**.
- L'utilisation des **langages communs pour exprimer les ontologies**.
- L'utilisation des **moteurs de raisonnement** pour inférer sur les annotations d'après les axiomes proposés.

L'architecture du web sémantique, proposée par le W3C, s'appuie sur une **représentation pyramidale** de langages associés aux ontologies, comme le montre la Figure 4.

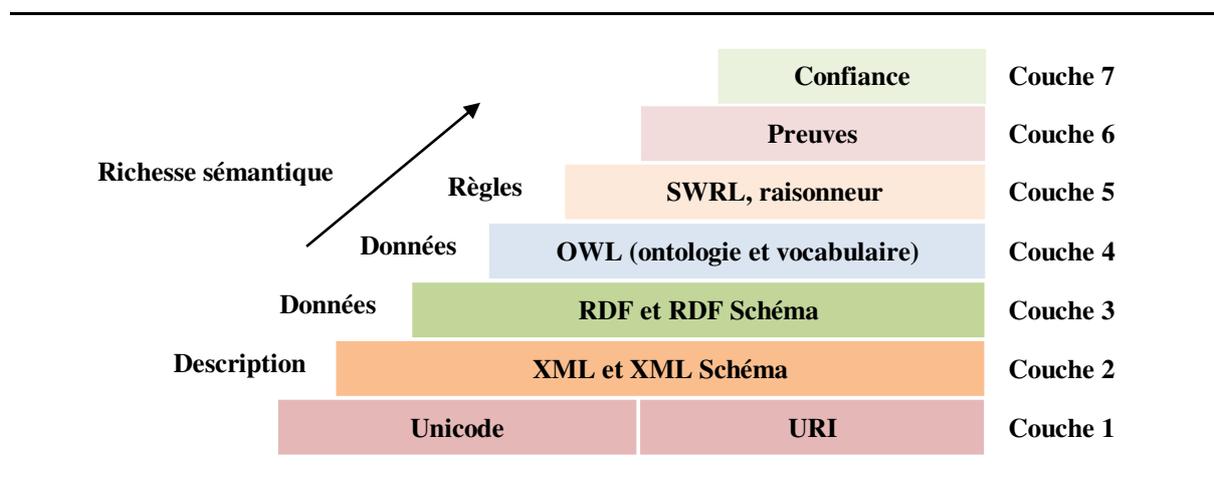


Figure 4. Représentation pyramidale du web sémantique [Berners-Lee et al., 2001].

La couche la plus basse assure l'interopérabilité syntaxique. Les données sont codées par le standard Unicode et possèdent une adresse Uniforme Ressource Identifier (URI) qui permet d'attribuer un identifiant unique et universel à un ensemble de données (Couche 1). Ces données peuvent être structurées grâce à eXtensible Markup language (XML). La syntaxe XML est considérée comme un premier niveau de la sémantique qui permet aux utilisateurs de structurer les données en fonction de leur contenu sans rien dire de la signification des structures. (Couche 2). Pour attribuer une signification à cette structure et relier d'une façon pertinente les différents éléments, les données sont structurées en utilisant le langage Resource Description Framework (RDF) [Brickley, 2004] (Couche 3). Au niveau de la couche 4, les données sont structurées avec le langage OWL [Bechhofer et al., 2004]. Seulement les quatre premières couches basses sont aujourd'hui relativement stabilisées.

3.2.1.2. Définition

Le terme ontologie est issu du domaine de la philosophie de la connaissance. Il désigne l'étude de l'être, de ses modalités et de ses propriétés. En Intelligence Artificielle, la littérature offre **plusieurs définitions du vocable ontologie** parce qu'elles dépendent du domaine d'appartenance de leurs auteurs et des objectifs à atteindre. L'ontologie informatique a en commun avec son homologue philosophique le fait de **conceptualiser et décrire l'existant au travers des catégories**.

Gruber propose la définition la plus citée. Il définit l'ontologie comme « **une représentation explicite d'une conceptualisation** » [Gruber, 1993]. Depuis, plusieurs définitions de l'ontologie sont introduites. Tout d'abord, l'ontologie est une « **représentation** » ; cela signifie qu'elle s'agit d'un outil de modélisation. Le terme « **explicite** » indique que l'ontologie est capable de modéliser l'ensemble des informations d'un domaine donné, quel que soit le niveau d'abstraction ou le type d'application. Dans le cas de la modélisation d'un produit, une ontologie doit permettre de représenter les informations liées au produit, mais aussi les méta-informations, corollaires au produit, mais de l'ordre du processus, de l'organisation, ou encore des ressources ou des règles. Enfin, le terme « **conceptualisation** » nous indique que le paradigme de modélisation de l'ontologie est de type concept-propriété (ou classe-relation). Les ontologies sont regroupées par concepts, qui interagissent potentiellement entre eux au moyen de relations. De plus, la conceptualisation renvoie à la définition d'une sémantique propre au domaine. Selon [Lee et al., 2009], une conceptualisation est « une extraction du vocabulaire d'un domaine et est une vue abstraite et simplifiée du monde que l'on souhaite représenter ».

[Borst et Akkermans, 1997] complètent la définition de [Gruber, 1993]. Ils définissent l'ontologie comme « une spécification formelle d'une conceptualisation partagée ». L'ajout du terme « **formelle** » implique que l'ontologie doit être compréhensible par une machine, ce qui exclut le langage naturel. Elle doit être exprimée dans un langage formalisé comme par exemple OWL ou RDFS permettant ainsi des raisonnements automatiques ayant pour objet soit d'effectuer des vérifications de consistance, soit d'inférer de nouveaux faits. L'ajout du terme « **partagée** » implique que plusieurs utilisateurs peuvent utiliser la même ontologie pour décrire le même domaine. Elle prend une dimension collaborative. Cette définition est enrichie par [Jean et al., 2007] en décrivant une ontologie comme « une représentation formelle, explicite, référençable et consensuelle de l'ensemble des concepts partagés d'un domaine en termes de classes d'appartenance et de propriétés caractéristiques ». Cette

définition met en avant trois caractéristiques qui distinguent une ontologie de domaine des autres modèles informatiques. L'ajout du terme « **consensuelle** » implique que l'ontologie est admise par l'ensemble des membres d'une communauté. L'ajout du terme « **référençable** » implique que toute entité ou relation décrite dans l'ontologie peut être directement référencée par un symbole (« **identifiant** »), à partir de n'importe quel contexte, afin d'explicitier la sémantique de l'élément référençant.

Nous pouvons distinguer **deux principaux objectifs de l'ontologie** :

- **Le premier est descriptif.** Il consiste à former une base de connaissances en modélisant un ensemble de connaissances dans un domaine donné.
- **Le deuxième est le raisonnement.** Il consiste à faire des inférences et générer automatiquement des connaissances à l'aide d'un ensemble de règles.

Le langage **OWL, recommandé par le W3C en 2004**, est le plus expressif des langages ontologiques [Baget et al., 2004]. Il est considéré comme une extension du RDF et RDFS. Le but est d'ajouter plus de formalisation dans l'expression des informations afin d'assurer leur validité. Il permet de définir des restrictions de cardinalités comme : « une personne a exactement deux parents » et « une personne reçoit l'enseignement d'au moins un professeur ». Avec OWL 2, nous pouvons aussi décrire des disjonctions de classes (par exemple : mâle et femelle) ou des combinaisons booléennes entre les classes (par exemple : la classe personne est l'union disjointe des classes mâle et femelle). Contrairement à RDF et RDFS, OWL 2 peut aussi exprimer des caractéristiques particulières des propriétés comme l'inverse de (par exemple « mange » est l'inverse de « est mangé par ») et la transitivité (la propriété « plus grand que » est transitive).

3.2.1.3. Composants

Les auteurs de [Charlet et al., 2005] présentent l'ensemble minimal de composants d'une ontologie :

- **Une classe (concept)** est un ensemble de ressources partageant les mêmes caractéristiques. Elle peut représenter un objet matériel, une notion, une action, un processus de raisonnement ou une idée. Chaque classe est associée à un ensemble d'individus. Elle est définie par un ensemble de propriétés et de relations qui la lient avec les classes voisines.

- **Les propriétés (attributs)** correspondent à des caractéristiques particulières, attachées à une classe et qui permettent de la définir de manière unique. Il existe deux types de propriétés : **propriétés d'objets** (object properties) qui lient les individus ou les classes entre eux et les **propriétés de type de données** (datatype properties) qui lient un individu avec une valeur donnée. Chaque propriété d'objet admet un domain (l'ensemble de ses concepts sources) et un range (l'ensemble de ses concepts destinations).
- **Les relations** d'une ontologie désignent les différentes corrélations entre les classes. Ces relations englobent les associations suivantes : sous-classe de (spécification ou généralisation), partie de (agrégation ou composition), instance de, etc. Les propriétés d'objets sont considérées comme des relations dans la plupart des travaux de recherche.
- **Les individus (instances)** sont des exemples d'une classe. Ils héritent alors toutes les propriétés de cette classe.

Il y a une distinction entre la base de faits qui contient les individus (**ABox**) et l'ontologie qui définit la terminologie (**TBox**).

3.2.2. Outils de visualisation d'ontologies

Dans la littérature, **il existe beaucoup d'outils de visualisation d'ontologies**. Nous classifions ces derniers, **selon l'utilisateur cible**, en deux catégories : « **outils de visualisation d'ontologies dédiés seulement aux experts du domaine** » et « **outils de visualisation d'ontologies dédiés aux non-connaisseurs du domaine** ».

Les outils qui ciblent seulement les experts du domaine sont les suivants : Fsviz [Carrière et al., 1995], Protégé class browser [Fridman et al., 2000], Jambalaya [Storey et al., 2001], Ontorama [Eklund et al., 2002], SpaceTree [Plaisant et al., 2002], TGViz Tab [Harith, 2003], OntoTrack [Liebig et Noppens, 2004], ezOWL [Chung et al., 2005], OntoViz Tab [Singh et al., 2006], OntoSphere [Bosca et al., 2006], CropCircles [Taowei et Parsia, 2006], GrOWL [Krivov et al., 2007], FlexViz [Falconer, 2009], OWLGrEd [Bārzdīņš et al., 2010], Knoocks [Kriglstein et Wallner, 2010], Onto3DViz [Guo et Chan, 2010], KC-Viz [Motta et al., 2011], OntoTriX [Bach et al., 2011], GLOW [Hop et al., 2012], NavigOWL [Hussain et

al., 2014], OWLPropViz¹¹, SOVA¹², VOM¹³, Treebolic¹⁴, JUNG¹⁵, OWLViz¹⁶, OntoGraf¹⁷, RDF Gravity¹⁸ et IsaViz¹⁹.

Les outils qui sont conçus pour être utilisés par des non-connaisseurs du domaine sont les suivants : OWLeasyViz [Catenazzi, 2013], Protégé VOWL [Lohmann et al., 2016] et WebVOWL [Lohmann et al., 2016]. Le Tableau 3 récapitule notre étude sur ces différents outils. Nous définissons un ensemble de critères de comparaison :

- **Visualisation 2d/3d** : ce critère représente si la visualisation générée est en 2 dimensions ou en 3 dimensions.
- **Représentation** : cette dimension représente les éléments visualisés de l'ontologie. Quatre sous-dimensions sont prises en compte : « **Visualisation de l'ABox** » (est-ce que les instances sont visualisées ou non ?), « **Classes et instances** » (comment les classes et les instances sont-elles représentées ?), « **Propriétés d'objets** » (est-ce que les propriétés d'objets sont visualisées ou non ?) et « **Propriétés de type de données** » (est-ce que les propriétés de type de données sont visualisées ou non ?) ;
- **Interactions** : les interactions concernent la façon dont l'utilisateur interagit avec la visualisation générée. Cinq types d'interactions sont retenus : « **Filtrage** » (l'utilisateur peut réduire la taille de la visualisation en éliminant un ou plusieurs composants de l'ontologie, par exemple : l'utilisateur peut appliquer un filtre pour ne pas afficher les propriétés d'objets), « **Recherche par mot-clé** », « **Zoom** », « **Vue d'ensemble** » (l'utilisateur peut avoir une vue d'ensemble de l'ontologie en entier) et « **Détails sur demande** » (l'utilisateur peut afficher les détails d'un élément particulier de la visualisation. Cela est habituellement accompli en cliquant sur un élément et en demandant l'affichage de ses détails dans une fenêtre auxiliaire) ;
- **Plateforme de développement** : ce critère représente la plateforme de développement de l'outil de visualisation d'ontologies.
- **Langage(s) de description de l'ontologie** : ce critère représente le(s) langage(s) de description de l'ontologie supporté(s).

¹¹ <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/OWLPropViz>

¹² <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/SOVA>

¹³ (Visual Ontology Modeler) <http://thematix.com/tools/vom>

¹⁴ <http://treebolic.sourceforge.net/>

¹⁵ <http://jung.sourceforge.net/doc/api/>

¹⁶ <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/OWLViz>

¹⁷ <http://protegewiki.stanford.edu/wiki/OntoGraf>

¹⁸ <http://semweb.salzburgresearch.at/apps/rdf-gravity/>

¹⁹ <https://www.w3.org/2001/11/IsaViz/overview.html>

- **Classification de [Katifori et Halatsis, 2007]** : jusqu'à présent, Katifori et Halatsis présentent l'étude comparative la plus complète des outils de visualisation d'ontologies. Ils classifient ces outils en six approches : « **Nœuds – liens** », « **Pavage de l'espace** », « **Zoomable** », « **Focus+contexte** », « **Listes indentées** » et « **3D information landscapes** ». L'approche « **Nœuds – liens** » consiste à représenter les classes et les instances par des symboles géométriques (par exemple : des cercles, des carrés, des losanges, des triangles, etc.). Puis, elle représente les relations d'héritage et les propriétés d'objets par un trait ou une flèche pour relier les différents nœuds. L'approche « **Pavage de l'espace** » se caractérise par une utilisation quasi intégrale de l'espace d'affichage pour la représentation de l'ontologie. Cette approche s'appuie sur le remplissage d'une surface rectangulaire pour faire apparaître la structure hiérarchique de l'ontologie. Elle attribue tout d'abord à la racine de la hiérarchie l'ensemble de la surface. Cet espace est ensuite subdivisé horizontalement en sous-rectangles qui représentent chacun un fils de la racine de telle sorte que leurs poids soient proportionnels à la surface occupée. Chaque sous-rectangle est à son tour subdivisé verticalement en sous-rectangles correspondant à ses fils, et ainsi de suite. L'approche « **Zoomable** » permet à l'utilisateur de « zoomer » certains nœuds de la visualisation. La vue initiale montre l'espace à une échelle qui permet d'afficher l'ontologie en entier. L'approche « **Focus+contexte** » permet d'afficher un objet d'intérêt (c'est le focus, la donnée centrale ou importante sur laquelle l'utilisateur porte toute son attention) entouré de son contexte (c'est-à-dire les éléments qui entourent spatialement l'objet d'intérêt ou qui lui sont liés par une relation donnée) sous une forme dégradée. Cette approche permet donc de garder une vue globale de l'espace d'information, mais la vue locale y est incrustée. L'approche « **Listes indentées** » permet de représenter une ontologie sous forme d'une liste indentée. Un élément de l'ontologie est représenté généralement par une icône avec le nom de l'élément placé à droite. Chaque élément est situé sous l'élément de niveau hiérarchique immédiatement supérieur avec une indentation plus importante. Chaque liste peut être pliée ou dépliée pour permettre de masquer ou d'afficher ses sous-éléments. L'approche « **3D information landscapes** » se réfère à des techniques qui utilisent des objets 3D de différentes couleurs et tailles pour visualiser l'ontologie.
- **Disponibilité** : cette dimension représente si l'outil de visualisation d'ontologies en question est disponible ou pas. Deux sous-dimensions sont associées : « **Plugin**

Protégé » (est-ce que l'outil de visualisation d'ontologies est implémenté en tant que plugin protégé ou pas ?) et « **Application autonome** » (est-ce que l'outil de visualisation d'ontologies est implémenté en tant qu'application autonome ou pas ?).

Tableau 3. Comparaison des outils de visualisation d'ontologies.

	Visualisation 2d/3d	Représentation				Interactions					Langage(s) de description de l'ontologie	Classification de Katifori	Disponibilité		
		Visualisation de l'ABox	Classes et instances	Propriétés d'objets	Propriétés de données	Filtrage	Recherche par mot clé	Zoom	Vue d'ensemble	Détails sur demande			Plateforme de développement	Application autonome	Plugin Protégé
« Outils de visualisation d'ontologies dédiés seulement aux experts du domaine »															
Fsviz	3d	Oui	Classes et instances : des formes 3D.	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non		Nœuds-liens	Non	Non
Jambalaya	2d	Oui	Classes et instances : des rectangles étiquetés.	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Java	OWL	Zoomable	Non	Oui
Ontorama	2d	Oui	Classes et instances : des rectangles étiquetés à l'intérieur d'un cercle.	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Java	RDF	Focalisation et contexte	Non	Non
SpaceTree	2d	Oui	Classes et instances : des rectangles étiquetés.	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Java		Nœuds-liens	Oui	Non
TGViz Tab	2d	Oui	Classes et instances : leurs noms. Seule la classe racine est représentée par un rectangle étiqueté.	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Java	OWL	Focalisation et contexte	Oui	Non
OntoTrack	2d	Oui	Classes et instances : des rectangles étiquetés.	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Java	OWL	Nœuds-liens	Oui	Non
ezOWL	2d	Oui	Classes et instances : des rectangles étiquetés.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Java	OWL	Nœuds-liens	Oui	Non

OntoViz Tab	2d	Oui	Classes : des rectangles noirs étiquetés, instances : des rectangles rouges étiquetés.	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Java	OWL	Nœuds-liens	Non	Oui
OntoSphere	3d	Oui	Classes et les instances : des sphères.	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Java	OWL RDF	Nœuds-liens	Non	Oui
CropCircles	2d	Oui	Classes et les instances : des cercles concentriques.	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Java	OWL RDF	Zoomable	Oui	Non
GrOWL	2d	Non	Classes : des rectangles étiquetés.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Java	OWL		Non	Non
FlexViz	2d	Oui	Classes et instances : des nœuds rectangulaires étiquetés. Les nœuds fils sont représentés sous leur nœud parent.	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Flex	OWL	Nœuds-liens	Oui	Non
OWLGrEd	2d	Non	Classes et instances : des tables (nom et propriétés).	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Java	OWL		Oui	Non
Knoocks	2d	Non	Classes : blocs (rectangles). Chaque bloc représente une classe avec ses sous-classes.	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	C#	OWL Lite		Non	Non
Onto3DViz	3d	Non	Classes : des sphères 3d. Instances : des cubes 3d.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Java	OWL	Nœuds-liens	Non	Non
KC-Viz	2d	Non	Classes : leur nom.	Oui	Non	Oui		Oui	Oui	Oui	Java	OWL		Oui	Non
OntoTrix	2d	Non	Classes : leurs noms.	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Java	OWL, RDF		Non	Non
GLOW	2d	Non	Classes : leurs noms et sont affichées autour d'un nœud central.	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Java	OWL		Oui	Non
NavigOWL	2d	Non	Classes et instances : des cercles, une	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Java	OWL,	Zoomable	Oui	Non

			couleur pour représenter les classes (jaune) et une autre pour représenter les instances (violet).									RDF			
OWLPropViz	2d	Non	Classes : des ellipses étiquetées.	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Java	OWL		Oui	Non
SOVA	2d	Non	Classes : des rectangles étiquetés.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Java	OWL		Oui	Non
VOM	2d	Non	Classes : des rectangles étiquetés.	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Java	OWL		Oui	Non
Treebolic	2d	Oui	Classes et instances : leurs noms. Il permet l'importation des photos pour identifier les nœuds.	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Java	OWL RDF	Focalisation et contexte	Oui	Non
JUNG	2d	Oui	Classes et instances : des cercles. La couleur par défaut des nœuds est le rouge.	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Java	OWL, RDF	Nœuds-liens	Oui	Non
OWLviz	2d	Oui	Classes et instances : ellipses étiquetées et colorées.	Non	Non	Oui		Oui	Oui		Java	OWL	Nœuds-liens	Oui	
OntoGraf	2d	Non	Classe : rectangle contenant un petit cercle marron. Instance : rectangle avec un losange violet.	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Java	OWL	Nœuds-liens	Oui	Non
RDF Gravity	2d	Oui	Classes et instances : des rectangles étiquetés. Chaque type d'élément possède sa propre couleur.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Java	RDF, OWL		Oui	Non
IsaViz	2d	Oui	Classes et instances : des ellipses étiquetées.	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Java	RDF	Nœuds-liens	Oui	Non
« Outils de visualisation d'ontologies dédiés aux non-connaisseurs du domaine »															
OWLLeasyViz	2d	Non	Classes : ellipses étiquetées.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui			OWL		Non	Non
Protégé VOWL	2d	Non	Classes : cercles étiquetés.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Java	OWL		Oui	Non

WebVOWL	2d	Non	Classes : cercles étiquetés.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Html	OWL		Oui	Non
----------------	----	-----	------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	--	-----	-----

La plupart des outils de visualisation d'ontologies sont **conçus pour être utilisés seulement par des experts du domaine**. Les autres outils visant les utilisateurs non-connaisseurs du domaine **ne sont pas conçus pour être utilisés par des malades d'Alzheimer**.

“The current ontology visualisation tools overlook the importance of Human–Computer Interaction (HCI) issues” [Motta et al., 2011]. Les outils de visualisation d'ontologies existants **ne prennent pas en considération le fait d'offrir une visualisation utilisable et accessible à l'utilisateur**. Par exemple, il n'y a pas d'outil qui utilise, comme seconde modalité, la reconnaissance vocale pour dicter les mots-clés dans les champs de saisie de recherche (pour aider les utilisateurs illettrés). Dans notre contexte, les problèmes relatifs à l'accessibilité de la visualisation générée s'aggravent, car notre utilisateur cible est un malade d'Alzheimer qui souffre de plusieurs incapacités physiques et cognitives. Par exemple, il a des difficultés à lire les petits nœuds et à comprendre le jargon technique. À notre connaissance, **il n'existe pas un outil de visualisation d'ontologies accessible aux malades d'Alzheimer**.

La plupart des outils de visualisation d'ontologies **négligent l'importance d'offrir une visualisation lisible et compréhensible**. Selon [Lohmann et al., 2016b], les outils de visualisation d'ontologies existant sont difficiles à lire par les non-connaisseurs du domaine. Ce problème devient plus critique pour ceux qui souffrent de la maladie d'Alzheimer. Par exemple, ils ont des difficultés à comprendre les graphes denses.

La plupart des outils de visualisation d'ontologies à base de graphe, comme SOVA, GrOWL, IsaViz et RDF Gravity, **nécessitent le chargement du graphe entier dans l'espace limité fourni par l'écran de l'ordinateur**, ce qui génère un nombre important de nœuds et un nombre plus important de liens croisés. Sans l'application du filtre, **le graphe généré apparaît très dense et encombré**, ce qui a un impact négatif sur sa lisibilité et sa compréhensibilité. Selon [Lohmann et al., 2016b], toutes les visualisations RDF sont difficiles à lire en raison de leur grande taille.

OWLGrEd, ezOWL et VOM proposent des visualisations d'ontologies basées sur le formalisme UML. Un inconvénient majeur de ces tentatives est qu'elles nécessitent une connaissance préalable des notions d'UML. Ainsi, elles ne sont pas compréhensibles par des utilisateurs non-connaisseurs du domaine.

Presque tous les outils de visualisation d'ontologies **utilisent un jargon technique**. Même WebVOWL et ProtégéVOWL, pour des utilisateurs moins familiers avec les ontologies, utilisent quelques mots relatifs au domaine du web sémantique.

SOVA, GROWL, WebVOWL et ProtégéVOWL visent à offrir une visualisation compréhensible par leurs cibles en définissant un ensemble de notations associées aux éléments-clés de l'ontologie (des différents symboles, couleurs et formes). Cependant, les notations proposées par SOVA et GrOWL contiennent de nombreuses abréviations et des symboles relatifs à la logique de description. Par conséquent, les visualisations générées par ces deux outils ne conviennent pas aux utilisateurs non-connaisseurs du domaine [Lohmann et al., 2016b]. WebVOWL et ProtégéVOWL visent à offrir une visualisation compréhensible. Cependant, ces deux outils se focalisent principalement sur la visualisation du TBox et n'affichent pas l'ABox.

KC-Viz vise à offrir une visualisation lisible en se basant sur une approche qui résume l'ontologie. Cependant, il ne visualise que le TBox et n'affiche pas l'ABox. Il vise seulement les experts du domaine (par exemple : l'utilisation du jargon technique, etc.).

La plupart des outils **ne visualisent pas tous les éléments-clés de l'ontologie** (c'est-à-dire les classes, les instances, les relations d'héritage, les propriétés de type de données et les propriétés d'objets). Par exemple, OntoViz Tab, OWLViz, TGViz et OntoRama visualisent seulement les relations d'héritage entre les nœuds affichés. OWLViz, OntoTrack et KC-Viz visualisent seulement la hiérarchie des classes.

La plupart des outils de visualisation d'ontologies qui affichent tous les éléments-clés de l'ontologie **n'offrent pas une distinction visuelle claire entre ces derniers**. Ils sont souvent difficiles à distinguer. Ce problème a un impact négatif sur la compréhensibilité de la visualisation générée. Par exemple, RDF Gravity ne fournit pas de distinction visuelle entre les propriétés d'objets et les propriétés de type de données.

Des outils de visualisation d'ontologies comme Kaon, Onto Graf et Onto3DViz supportent la visualisation des propriétés d'objets. Cependant, ils ne les représentent pas en tant que liens étiquetés. Les propriétés d'objets sont représentées seulement par des flèches.

La plupart des outils de visualisation d'ontologies **ne supportent pas le passage à l'échelle**. Selon [Katifori et Halatsis, 2007], les visualisations générées par TGVizTab et OntoViz sont impossibles à lire même si le nombre de noeuds est moins de 300. Les

visualisations générées avec IsaViz, Jambalaya, CropCircles et IsaViz ne doivent pas dépasser 1000 nœuds.

La plupart des outils de visualisation d'ontologies sont **implémentés en tant que plugins pour Protégé**. Par la suite, ces outils ne peuvent pas être intégrés dans le prototype de CAPTAIN MEMO.

3.2.3. Outils de visualisation des données liées

Memo Graph supporte aussi la visualisation des données ouvertes liées. C'est pour cela que nous effectuons un état de l'art sur les outils de visualisation des données liées. Nous classifions ces derniers en « **outils conçus spécialement pour la visualisation des données liées** » et « **outils proposés principalement pour la visualisation d'ontologies supportant aussi la visualisation des données liées** ». Les outils de visualisation des données liées les plus cités sont les suivants : Tabulator [Berners-Lee et al., 2006], Fenfire [Hastrup et al., 2008], DBpedia Mobile [Becker et Bizer, 2009], LESS [Auer et al., 2010], Sgvizler [Skjæveland, 2012], Rhizomer [Brunetti et al., 2012], Explorator [Araujo et al., 2013], VisualBox [Graves, 2013], LDVizWiz [Atemezing et Troncy, 2014], LODVizSuite [De Vocht, 2014], Payola [Klímek et al., 2014], LOD visualisation²⁰, Dipper²¹, Disco²² et Exhibit²³. IsaViz et RDF Gravity sont deux outils de visualisation d'ontologies qui supportent aussi la visualisation des données liées. Le Tableau 4 résume les caractéristiques des outils cités.

²⁰ <http://lodvisualization.appspot.com/>

²¹ <http://api.talis.com/stores/iand-dev1/items/dipper.htm>

²² <http://www4.wiwiw.fu-berlin.de/bizer/ng4j/disco>

²³ <http://www.simile-widgets.org/exhibit>

Tableau 4. Outils de visualisation des données liées.

	2d/3d	Représentation			Interactions					Type d'application	Dédié à tous	Multiples jeux de données	Disponibilité
		Spécificités de la visualisation	Propriétés d'objets	Propriétés de données	Filtrage	Recherche par mot clé	Zoom	Vue d'ensemble	Détails sur demande				
« Outils conçus spécialement pour la visualisation des données liées »													
Disco	1d	Présentation basée sur le texte.	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Oui	Web	Non	Non	Oui
Exhibit	2d	Carte, timeline et chart.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Web	Non	Non	Oui
DBpedia Mobile	2d	Carte.	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Mobile	Non	Oui	Oui
Tabulator	2d	Carte et timeline.	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Web	Non	Non	Oui
Rhizomer	2d	Carte d'arbre, timeline, carte et chart.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Web	Non	Oui	Oui
Fenfire	2d	Graphe.	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Web	Non	Non	Oui
LESS	2d	Graphe	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Web	Non	Oui	Oui
Payola	2d	Chart, cercles, graphe, carte, timeline et arbres.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Web	Non	Oui	Oui
LOD visualisation	2d	Graphe.	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Web	Non	Oui	Oui
Dipper	1d	Présentation basée sur le texte.	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Web	Non	Oui	Oui
Sgvizler	2d	Chart, graphe, timeline, carte, carte d'arbre.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Web	Non	Non	Oui
LDVizWiz	2d	Carte, pie et arbre.	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Web	Non	Non	Non
VisualBox	2d	Carte.	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Web	Non	Oui	Non
LODVizSuite	2d	Carte d'arbre, carte, arbre.	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Web	Non	Non	Non
Explorator	2d	Graphe.	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Web	Non	Non	Oui

« Outils proposés principalement pour la visualisation d'ontologies supportant aussi la visualisation des données liées »													
RDF Gravity	2d	Classes et instances des rectangles étiquetés.	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Java	Non	Non	Oui
IsaViz	2d	Classes et instances : des ellipses étiquetées.	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Non	Java	Non	Non	Oui

La plupart des outils de visualisation des données liées **sont conçus pour être utilisés seulement par des experts du domaine** [Dadzie et Rowe, 2011] [Brunetti et al., 2013] [Klímek et al., 2014]. Par exemple, les visualisations générées à l'aide de LDVizWiz et Sgvizler sont basées sur l'utilisation des requêtes SPARQL. D'autres outils **utilisent un jargon technique**. Tous les outils qui génèrent une visualisation à base de texte, sauf Piggy Bank, sont proposés pour être utilisés par des experts du domaine. Cependant, les autres outils, pour les utilisateurs non-connaisseurs du domaine, **ne sont pas faciles à configurer et à utiliser** [Dadzie et Rowe, 2011] [Atemezing et Troncy, 2014].

Très peu d'outils supportent la visualisation des jeux de données liées à large échelle. Cependant, ils ne pas prendre en compte des problèmes liés à la performance [Bikakis et Sellis, 2016]. La plupart de ces outils nécessitent le chargement du graphe entier dans l'espace limité fourni par l'écran de l'ordinateur. **Les visualisations générées apparaissent très denses et encombrées, ce qui a un impact négatif sur leurs lisibilités et leurs compréhensibilités. Ces problèmes s'aggravent avec les utilisateurs non-connaisseurs du domaine.** Pour supporter le passage à l'échelle, ces outils de visualisation se fondent sur une des deux techniques. La première technique consiste à suggérer un workflow pour l'exploration de la visualisation générée : "1-Overview, 2-Filter, 3-Visualize" (par exemple : Rhizomer et RDF Gravity). La seconde technique utilise le paradigme de navigation des clustered graphs. Toutes les visualisations à base de graphe ne supportent pas le passage à l'échelle [Brunetti et al., 2013]. Selon [Brunetti et al., 2013] et [Valsecchi et al., 2015], **tous les outils supportant le passage à l'échelle n'offrent pas des visualisations lisibles et compréhensibles**. DBpedia Viewer supporte le passage à l'échelle. Cependant, il visualise un seul jeu de données ouvertes liées – DBpedia.

LD-VOWL est le seul outil de visualisation qui vise à offrir une visualisation compréhensible en se basant sur une approche qui résume les jeux de données liées. Cependant, il ne visualise que le TBox et n'affiche pas l'ABox.

Les outils de visualisation à base de graphe aident à mieux comprendre les jeux de données liées [Brunetti et al., 2013] [Valsecchi et al., 2015]. Selon [Dadzie et Rowe, 2011], les visualisations à base de texte ne sont pas efficaces.

Très peu d'outils visualisent tous les éléments-clés des jeux de données liées. Cependant, un nombre plus petit de ces outils offre des représentations visuelles différentes et claires pour chaque élément-clé.

Seuls très peu d'outils de visualisation des données liées extraient et visualisent le TBox [Valsecchi et al., 2015], par exemple : CODE, VizBoard et LD-VOWL.

Très peu d'outils de visualisation d'ontologies supportent aussi la visualisation des jeux de données liées.

3.3. Présentation de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph

Dans la présente section, nous présentons **notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph**. Il offre une visualisation **accessible aux malades d'Alzheimer**. Il est conçu principalement pour être intégré dans le prototype de CAPTAIN MEMO. La conception du graphe généré est basée sur notre **guide de bonnes pratiques d'ergonomie**. Memo Graph est basé aussi sur notre **approche IKIEV**. Cette dernière permet, **d'une façon incrémentale, l'extraction et la visualisation du résumé de l'ABox de l'ontologie**. Memo Graph est proposé principalement pour visualiser les ontologies, mais il supporte aussi la visualisation des **données ouvertes liées**. Il peut être intégré dans d'autres applications pour les non-connaisseurs du domaine et il peut être utilisé en tant qu'application autonome par des experts du domaine pour visualiser non seulement des entrées à petite échelle, mais aussi des entrées à **large échelle**.

3.3.1. Une visualisation à base de graphe

Memo Graph visualise l'ontologie, **formalisée en OWL ou RDF**, sous forme d'**un graphe**. Il se fonde sur un **algorithme de champs de forces**. Ce dernier présente deux avantages majeurs. (1) Il optimise l'utilisation de l'écran. Il affiche les nœuds de façon à ce que les nœuds fortement connectés soient placés plus au centre de la visualisation, tandis que les nœuds les moins connectés soient affichés à la périphérie. (2) Il accroît la lisibilité du graphe, car il tend à éviter les croisements des liens. Il affiche **tous les éléments-clés de l'ontologie**. Il représente les propriétés d'objets entre les nœuds concernés par des liens étiquetés. Afin d'être distinguées des instances, les classes apparaissent plus grandes.

3.3.2. Accessibilité de la visualisation générée

Memo Graph offre une visualisation accessible aux malades d'Alzheimer. Nous la concevons en nous basant sur notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie.

Par rapport aux travaux connexes, Memo Graph représente **les nœuds du graphe par des photos étiquetées** (G2.33, G2.34 et G2.36). L'utilisation des photos aide l'utilisateur à comprendre le contenu et facilite l'identification visuelle des différents nœuds. **Les photos peuvent être automatiquement extraites à partir de Google** si l'utilisateur ne les fournit pas.

Le graphe généré à l'aide de Memo Graph fournit un **contenu textuel lisible** et des nœuds de grande taille (G5.1). Nous utilisons 15-pt pour le texte affiché. Nous utilisons la couleur noire pour le texte sur un fond clair (G5.18, G5.19, G5.24, G5.25, G5.26, G5.27 et G5.28) pour maximiser le contraste entre la couleur de l'arrière-plan et le texte en avant-plan (G5.21). Nous utilisons seulement la police Sans-Serif (G5.3, G5.4 et G2.40).

Memo Graph permet à l'utilisateur de **zoomer et de dézoomer** le graphe résultant ("zoom-in" et "zoom-out") (G5.36). Le zoom est infini. Nous utilisons un rythme simple et lent pour l'animation (G2.38). Lorsqu'un nœud du graphe est sélectionné, ce dernier apparaît légèrement plus grand afin d'être distingué des autres.

Nous utilisons un **vocabulaire facile à comprendre** et nous évitons l'emploi des mots techniques réservés au domaine du web sémantique (G2.1).

Memo Graph offre une interface utilisateur **vocale** (G2.14, G5.37 et G9.1). Nous ajoutons un arrière-plan sonore pour supporter les utilisateurs dans leurs interactions. Nous utilisons, par défaut, un volume plus élevé (G6.1). Nous utilisons le « discours naturel » (G6.4) et une voix masculine (G6.3). Nous réduisons la vitesse de l'arrière-plan sonore (G6.5 et G6.6). Les utilisateurs peuvent ajuster le volume selon leur choix (G6.10), réécouter les messages auditifs (G6.9) et arrêter l'arrière-plan sonore (G6.8). Nous plaçons le bouton du réglage du volume à droite en bas (G6.15).

L'interface utilisateur de Memo Graph se compose de trois panneaux : un pour visualiser l'ontologie sous forme d'un graphe (« Memo Graph Viewer »), un autre représentant les détails d'un nœud sélectionné (« Memo Graph Details ») et le dernier permettant la recherche d'un nœud particulier dans le graphe (« Memo Graph Search ») (G2.29). Pour rendre ces trois panneaux plus distincts, nous attribuons à chacun une couleur différente (G2.27). Le graphe est affiché au milieu de l'interface. Les nœuds fortement connectés sont placés plus au centre de la visualisation, tandis que les nœuds les moins connectés sont affichés à la périphérie (G2.23).

Memo Graph possède un moteur de recherche qui permet de trouver un nœud spécifique du graphe (une classe ou une instance) à travers la saisie d'un mot-clé dans un champ de saisie. Pour la saisie, nous offrons deux modalités : la saisie à partir du clavier et la **reconnaissance vocale** (G9.5 et G9.7). Nous permettons l'alternance entre ces deux modalités. La recherche d'une classe donnée provoque l'affichage de cette dernière avec ses instances. Pour la recherche des instances, notre outil affiche l'instance en question avec ses différentes connexions dans le graphe (ses propriétés d'objets) et ses propriétés de type de données. De plus, il supporte la possibilité de faire une recherche à travers le graphe. Lorsqu'un nœud instance est sélectionné, ses propriétés de type de données sont affichées dans le panneau « Memo Graph Details ».

3.3.3. Lisibilité et compréhensibilité de la visualisation générée : notre approche IKIEV

Pour assurer la lisibilité et la compréhensibilité de la visualisation générée avec Memo Graph, nous nous basons sur notre approche IKIEV. Elle permet **l'extraction et la visualisation, d'une façon incrémentale, du résumé de l'ABox de l'ontologie à visualiser.**

En nous basant sur notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie, **le graphe généré ne doit pas être dense.** Les nœuds doivent être grands, occupant par la suite un espace plus important de l'écran. Il faut éviter aussi l'utilisation de la barre de défilement. Par la suite, il est indispensable de limiter le nombre de concepts affichés (nœuds et liens), afin de ne pas surcharger l'écran et assurer la convivialité de la visualisation [Motta et al., 2011] [Ranwez et al., 2012]. Le choix des éléments affichés ne doit pas être arbitraire. Il faut afficher seulement les éléments « les plus importants » ce qui correspond au résumé de l'ontologie.

Memo Graph est proposé principalement pour être intégré dans le prototype de CAPTAIN MEMO afin de visualiser un ensemble de données structurées selon l'ontologie MemoFuzzyOnto. C'est pour cela que notre approche IKIEV est limitée à l'extraction et la visualisation du **résumé de l'ABox de l'ontologie et non du TBox.** Notre objectif est d'extraire un ensemble d'**instances-clés** décrivant au mieux l'ABox de l'ontologie ainsi que l'ensemble des propriétés associées.

Notre approche IKIEV est itérative et incrémentale. Initialement, elle extrait un résumé de N_0 instances-clés et les propriétés associées pour générer un graphe initial de ces dernières (N_0 est défini par l'utilisateur). Ensuite, elle permet une visualisation, d'une façon itérative et incrémentale, de nœuds supplémentaires si nécessaire. Pour chaque itération i , elle

extrait et visualise $N_i = N_{i-1} + A_i$ instances-clés; où A_i représente le nombre de nœuds supplémentaires par rapport à l'itération précédente (A_i est défini par l'utilisateur). La Figure 5 résume notre approche.

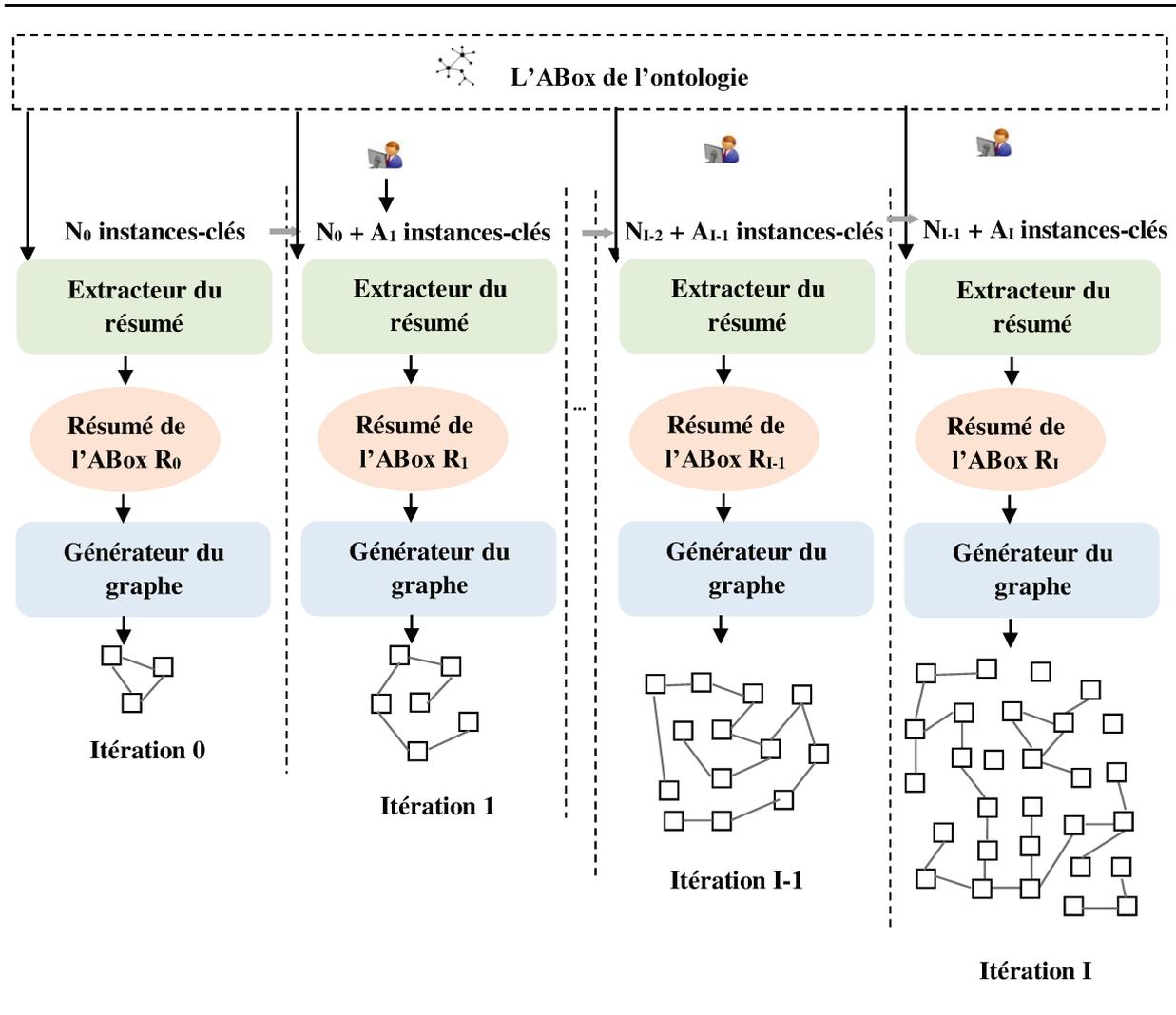


Figure 5. Notre approche IKIEV.

3.3.3.1. Mesures déterminant les instances-clés

Dans la littérature, **il n'existe pas beaucoup de travaux focalisant sur le résumé d'ontologie** (par exemple : [Motta et al., 2011], [Zhang et al., 2007], [Peroni et al., 2008] et [Troullinou et al., 2017]). Dans cette section, nous proposons un ensemble de mesures permettant de déterminer les instances-clés d'une ontologie donnée.

Soit une ontologie $O = (C, P, N)$, avec C représente l'ensemble des classes c_i ; P représente l'ensemble des propriétés $p_i(c_i)$ avec $c_i \in C$ et N représente un ensemble d'instances $n_i(c_i)$ avec $c_i \in C$. Nous définissons les fonctions suivantes :

- **NumberInstancesProperty**(p_k) retourne le nombre d'instances de $p_k(c_k)$;
- **Properties**(c_k) retourne les propriétés d'objets et les propriétés de type de données associées à la classe c_k ;
- **aCC**(c_k) est une agrégation pondérée du nombre des sous-classes directes, des superclasses, des propriétés et des instances de c_k ;
- **Nearest** (c_k) retourne la classe c_k , ses sous-classes et ses superclasses ;
- **Instances**(c_k) retourne les instances associées à c_k ;
- **GoogleHits**(n_k) retourne le nombre de visites que nous obtenons en interrogeant Google avec le mot-clé n_k ;
- **MemoGraphHits**(n_k) retourne le nombre de visites du nœud qui représente l'instance n_k enregistré dans les sessions de navigation précédentes par l'utilisateur de Memo Graph (nous utilisons un outil de suivi des clics) ;
- **NumberProperties**(n_k) retourne le nombre de propriétés d'objets entrant / sortant et de propriétés de données associées à n_k .

Pour estimer l'importance d'une instance donnée n_k , nous nous basons sur l'importance de ses propriétés retournées par **Properties**(c_k), sa classe c_k et le nombre de visites de l'instance en question.

3.3.3.1.1. Property Centrality

Nous définissons la mesure Property Centrality, $PC(p_k) \in [0..1]$, pour estimer l'importance d'une propriété donnée $p_k(c_k) \in P$. Nous utilisons les deux sous-mesures suivantes : Global Property Centrality et Local Property Centrality.

La première sous-mesure Global Property Centrality, $GPC(p_k) \in [0..1]$, reflète l'importance de la propriété $p_k(c_k)$ relativement à l'ensemble de toutes les propriétés de l'ontologie.

$$GPC(p_k) = \text{NumberInstancesProperty}(p_k) / \text{Max} \{ \forall p_i \in P \rightarrow \text{NumberInstancesProperty}(p_i) \}$$

La seconde sous-mesure Local Property Centrality, $LPC(p_k) \in [0..1]$, reflète l'importance de la propriété $p_k(c_k)$ par rapport aux propriétés associées à la classe c_k .

$$LPC(p_k) = \text{NumberInstancesProperty}(p_k) / \text{Max} \{ \forall p_i \in \text{Properties}(c_k) \rightarrow \text{NumberInstancesProperty}(p_i) \}$$

La mesure globale Property Centrality est obtenue en combinant la sous-mesure Global Property Centrality et la sous-mesure "Local Property Centrality associée chacune à un poids spécifique.

$$PC(p_k) = GPC(p_k) * W_{PG} + LPC(p_k) * W_{PL} \text{ avec } W_{PG} + W_{PL} = 1$$

3.3.3.1.2. Class Centrality

Nous définissons la mesure Class Centrality, $CC(c_k) \in [0..1]$, pour estimer l'importance d'une classe donnée $c_k \in C$. Nous utilisons les deux sous-mesures suivantes : Global Class Centrality et Local Class Centrality.

La première sous-mesure Global Class Centrality, $GCC(c_k) \in [0..1]$, reflète l'importance de la classe c_k relativement à l'ensemble des classes de l'ontologie.

$$GCC(c_k) = aCC(c_k) / \text{Max} \{ \forall c_i \in C \rightarrow aCC(c_i) \}$$

La seconde sous-mesure Local Class Centrality, $LCC(c_k) \in [0..1]$, reflète l'importance de la classe c_k par rapport aux classes les plus proches (les classes retournées par la fonction $\text{Nearest}(c_k)$).

$$LCC(c_k) = aCC(c_k) / \text{Max} \{ \forall c_i \in \text{Nearest}(c_k) \rightarrow aCC(c_i) \}$$

La mesure globale Class Centrality est obtenue en combinant la sous-mesure Global Class Centrality et la sous-mesure Local Class Centrality associée chacune à un poids spécifique.

$$CC(c_k) = GCC(c_k) * W_{CG} + LCC(c_k) * W_{CL} \text{ avec } W_{CG} + W_{CL} = 1$$

3.3.3.1.3. Hits Centrality

Nous définissons la mesure Hits Centrality, $HC(n_k) \in [0..1]$. Elle permet d'identifier les instances fréquemment visitées par les utilisateurs. Nous utilisons deux sous-mesures : Global Hits Centrality et Local Hits Centrality. Pour estimer ces deux dernières, nous nous basons sur le nombre de visites que nous obtenons en interrogeant Google avec le nom de l'instance en question et le nombre de visites du nœud qui représente l'instance en question, enregistré dans les sessions de navigation précédentes par l'utilisateur de Memo Graph.

La première sous-mesure Global Hits Centrality, $GHC(n_k) \in [0..1]$, reflète l'importance de l'instance $n_k(c_k)$ par rapport à l'ensemble de toutes les instances de l'ontologie.

$$GHC(n_k) = \text{GoogleHits}(n_k) * W_G + \text{MemoGraphHits}(n_k) * W_M / \text{Max} \{ \forall n_i \in N \rightarrow \text{GoogleHits}(n_i) * W_G + \text{MemoGraphHits}(n_i) * W_M \} \text{ avec } W_G + W_M = 1$$

La seconde sous-mesure Local Hits Centrality, $LHC(n_k) \in [0..1]$, reflète l'importance de cette dernière par rapport aux instances associées à la classe c_k .

$$LHC(n_k) = \text{GoogleHits}(n_k) * W_G + \text{MemoGraphHits}(n_k) * W_M / \text{Max} \{ \forall n_i \in \text{Instances}(c_k) \rightarrow \text{GoogleHits}(n_i) * W_G + \text{MemoGraphHits}(n_i) * W_M \} \text{ avec } W_G + W_M = 1$$

La mesure globale Hits Centrality est obtenue en combinant la sous-mesure Global Hits Centrality et la sous-mesure Local Hits Centrality associée chacune à un poids spécifique.

$$HC(n_k) = GHC(n_k) * W_{HG} + LHC(n_k) * W_{HL} \text{ avec } W_{HG} + W_{HL} = 1$$

3.3.3.1.4. Instance Importance

Nous définissons le score Instance Importance, $\text{Score}(n_k)$, pour estimer l'importance d'une instance donnée n_k . Ce score fait appel aux trois mesures précédemment définies.

$$\text{Score}(n_k) = (\sum PC(p_k) / \text{NumberProperties}(n_k)) * W_P + CC(c_k) * W_C + HC(n_k) * W_H \text{ avec } W_P + W_C + W_H = 1$$

Nous classons les instances en fonction de leurs scores Instance Importance. Un score plus élevé pour une instance signifie qu'elle est plus appropriée pour le résumé de l'ABox.

3.3.3.2. Algorithme général

L'algorithme général selon notre approche IKIEV est le suivant :

Inputs: Une ontologie $O = (C, P, N)$, un nombre initial d'instances-clés N_0

Outputs: Des graphes du résumé (R_i) de l'ABox de O

1. **Pour** chaque instance $n_i \in N$
 - Calculer le score Instance Importance de n_i $\text{Score}(n_i)$;
 2. Extraire le résumé (R_0) de l'ABox de O
 - 2.1. Extraire les N_0 instances-clés ayant les scores les plus élevés ;
 - 2.2. Enrichir les N_0 instances-clés avec les propriétés associées ;
 3. Générer un graphe initial du résumé (R_0) (N_0 noeuds) ;
 4. **Tant que** (*l'utilisateur veut visualiser* A_i noeuds supplémentaires **ET** $[N_{i-1} + A_i] \leq |O|$) **faire**
 - 1.1. Extraire le résumé (R_i) de l'ABox de O
-

-
- 1.1.1. Extraire les $[N_{i-1} + A_i]$ instances-clés ayant les scores les plus élevés ;
 - 1.1.2. Enrichir les $[N_{i-1} + A_i]$ instances-clés avec les propriétés associées ;
 - 1.2. Générer un graph du résumé (R_i) ;
 - 1.3. $i := i + 1$;
-

Algorithme 1. Notre approche IKIEV.

3.3.4. Implémentation

Memo Graph est une application du **web sémantique**, basée sur la plateforme **J2EE**, l'architecture **3-tiers** et le design pattern **MVC**²⁴ (modèle-vue-contrôleur) [Krasner et Pope, 1988]. Nous utilisons le serveur d'application GlassFish²⁵, le serveur HTTP Apache²⁶, le langage d'interrogation **SPARQL**²⁷ et la librairie **JENA**²⁸ [McBride, 2001].

Memo Graph est basée sur MVC. Son principe fondamental est de dissocier le modèle, contenant les informations, de ses vues. Le lien entre le modèle et les vues n'est pas direct, mais il existe au travers d'une entité intermédiaire nommée « contrôleur ». Chaque vue possède un contrôleur et toutes les interactions sur la vue passent par ce contrôleur. Comme notre prototype est basé sur la plateforme J2EE, les vues sont des pages JSP. Les contrôleurs sont des servlets. Le modèle est un ensemble de classes Java. Pour mettre en œuvre une architecture 3-tiers, nous distribuons le modèle MVC sur la « couche présentation » (la vue et son contrôleur) et la « couche de données » (le modèle).

JENA est une librairie Java open source développé par le laboratoire de Hewlett-Packard permettant la création et la manipulation d'ontologies OWL et de graphes RDF. Il fournit un moteur d'inférences permettant des raisonnements sur les ontologies. JENA est maintenant sous Apache Software Licence.

Memo Graph est formé par deux composants : « **l'extracteur du résumé** » et « **le générateur du graphe** », comme le montre la Figure 6. Le premier permet l'extraction des instances-clés et leurs propriétés associées. Le second permet la visualisation du résumé sous forme de graphe.

²⁴ <https://en.wikipedia.org/wiki/Model-view-controller>

²⁵ <https://glassfish.java.net/>

²⁶ <http://www.apache.org/>

²⁷ <http://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

²⁸ <https://jena.apache.org/>

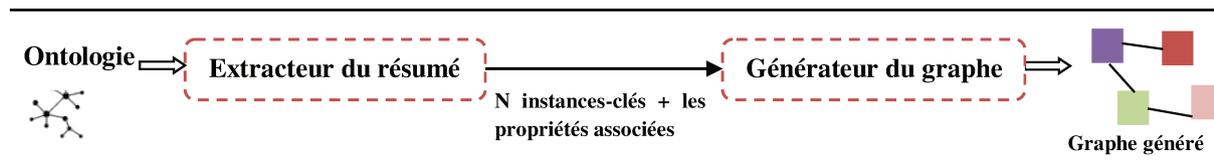


Figure 6. Architecture de Memo Graph.

3.3.5. Quelques utilisations

Dans cette section, nous présentons quelques utilisations de Memo Graph. Il est testé, en tant qu'application autonome, pour visualiser **l'ontologie à petite échelle Friend Of A Friend²⁹ (FOAF)** et **le jeu de données ouvertes liées à large échelle DBpedia**.

3.3.5.1. Visualisation de l'ontologie à petite échelle FOAF

Memo Graph est utilisé pour visualiser FOAF. C'est une ontologie RDF à petite échelle permettant de décrire les personnes et les relations qu'elles entretiennent entre elles. La Figure 7 montre le graphe généré. Nous appliquons des filtres pour afficher seulement les classes. Nous sélectionnons la classe « Personne » pour afficher ses propriétés de type de données dans le panneau « Memo Graph Details ». Les photos affichées sont automatiquement extraites de Google. Comme FOAF est une ontologie à petite-échelle, nous n'avons pas eu recours à notre approche IKIEV.

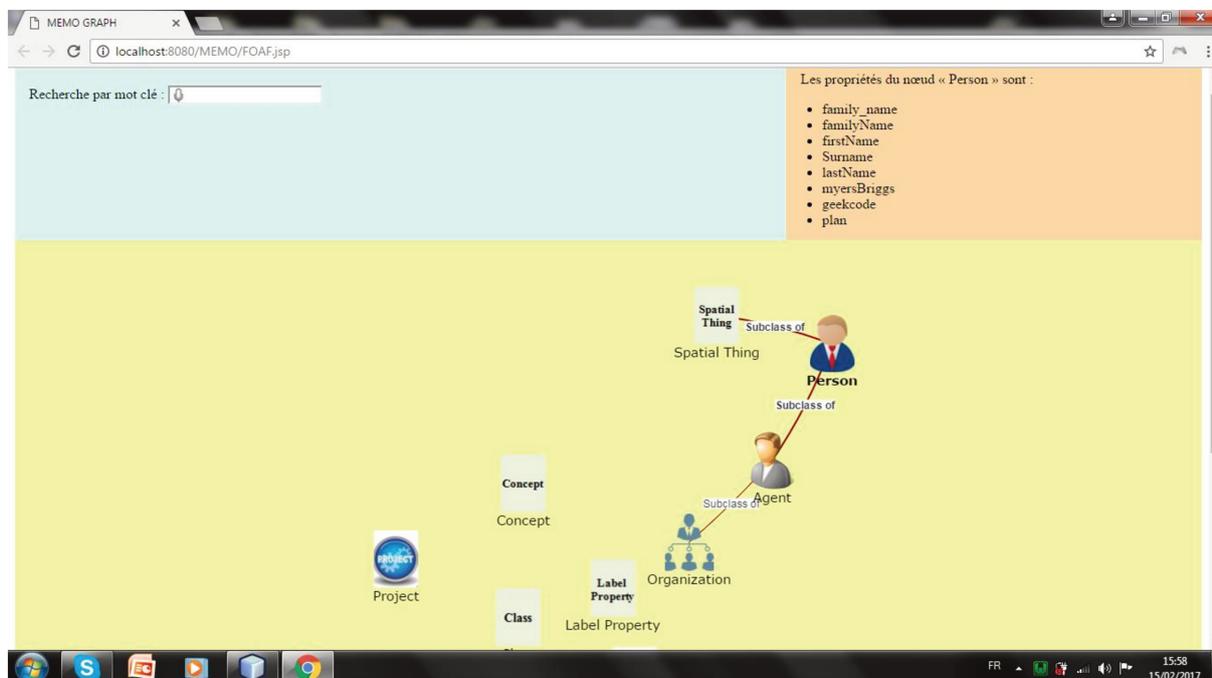


Figure 7. Graphe généré à partir de l'ontologie FOAF à l'aide de Memo Graph.

²⁹ <http://xmlns.com/foaf/spec/>

3.3.5.2. Visualisation du jeu de données ouvertes liées à large échelle DBpedia

Nous utilisons Memo Graph pour visualiser une partie du jeu de données ouvertes liées à large échelle DBpedia. DBpedia permet l'exploration et l'extraction automatique de données dérivées de Wikipédia. À l'heure actuelle, elle couvre 685 classes décrites par 2 795 propriétés et environ 4 233 000 instances. Nous avons eu recours à notre approche IKIEV pour alléger le graphe résultant.

La Figure 8 montre un aperçu du Memo Graph utilisé pour visualiser 30 instances-clés de la classe « Sport » (par exemple : Tennis, Golf, Tejo, etc.). Par rapport aux travaux connexes, il présente **l'avantage d'ajouter automatiquement des images, à partir de Google**, aux nœuds visualisés.

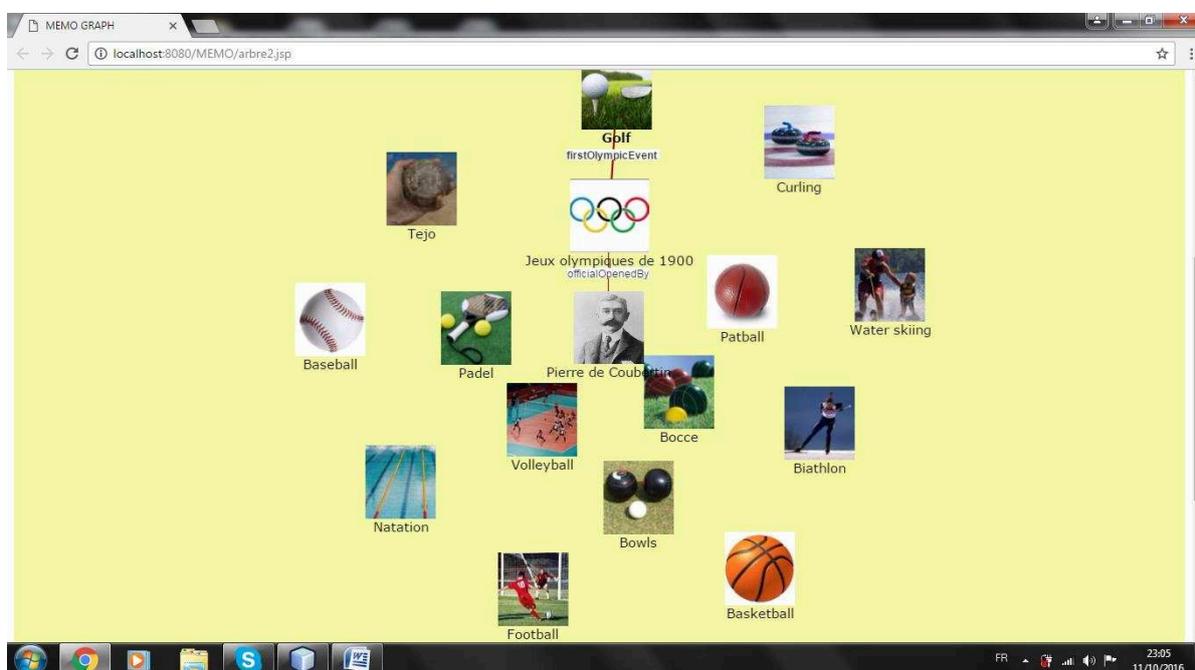


Figure 8. Graphe généré à l'aide de Memo Graph à partir des 30 instances-clés de la classe « sport ».

En général, Memo Graph permet d'offrir une visualisation **compréhensible des entrées à large échelle, car il se base sur notre approche IKIEV.**

3.4. Évaluation de Memo Graph avec des experts du domaine

Memo Graph est conçu principalement pour être intégré dans le prototype de CAPTAIN MEMO et utilisé par des malades d'Alzheimer. Mais il peut être utilisable, en tant

qu'application autonome, par des experts du domaine. Ainsi, dans la présente section, **nous évaluons la performance et l'utilisabilité de Memo Graph avec des experts du domaine.**

Cette évaluation fait intervenir **24 experts du domaine**. Ils sont des membres du laboratoire de recherche MIRACL (Université de Sfax, Tunisie).

Un questionnaire de sélection est élaboré pour sélectionner les participants en se basant sur leurs profils scientifiques (leur expertise dans le domaine du web sémantique, les ontologies, les langages de description d'ontologies, le web de données, la visualisation de données, etc.).

3.4.1. Évaluation de la performance

L'évaluation de la performance de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph est réalisée en **trois phases** :

- **Étude quantitative** : les participants sont répartis en trois groupes. Chaque groupe utilise un outil de visualisation d'ontologies différent pour effectuer quelques tâches demandées.
- **Étude qualitative** : chaque participant remplit un questionnaire pour décrire qualitativement son opinion générale vis-à-vis de l'outil de visualisation d'ontologies qu'il a utilisé dans la phase de l'étude quantitative.
- **Pensée à voix haute** : tous les participants sont invités à explorer librement Memo Graph et à discuter à voix haute de ce dernier.

3.4.1.1. Étude quantitative

Les participants sont aléatoirement divisés en trois groupes nommés GX, GY et GZ. Chaque groupe utilise un outil de visualisation d'ontologies différent. **Les membres du groupe GX utilisent RDF Gravity. Les membres du groupe GY utilisent WebVOWL. Les membres du groupe GZ utilisent Memo Graph.** Nous utilisons l'ontologie à petite-échelle FOAF.

Au début de la session, nous informons les participants du but de l'expérience. Pour éviter d'être contre ou en faveur d'un outil spécifique, les participants sont informés que le but de l'expérience est d'évaluer certains outils de visualisation d'ontologies disponibles dans la littérature.

Les membres du groupe GX répondent aux questions en utilisant **RDF Gravity**. Ce dernier visualise les ontologies et les jeux de données liées. Il **n'offre pas une distinction visuelle entre les propriétés de type de données et les propriétés d'objets**. Il fournit plusieurs techniques d'interaction (filtrage, zoom et recherche). Cependant, la **fonctionnalité de la recherche ne met pas en valeur le(s) élément(s) concerné(s) dans le graphe**, comme le montre la Figure 9. Nous utilisons la fonctionnalité de la recherche (nous cherchons la classe "Organization"). **Sans l'application du filtre, le graphe est très dense, ce qui a un impact négatif sur sa lisibilité et sa compréhension.**

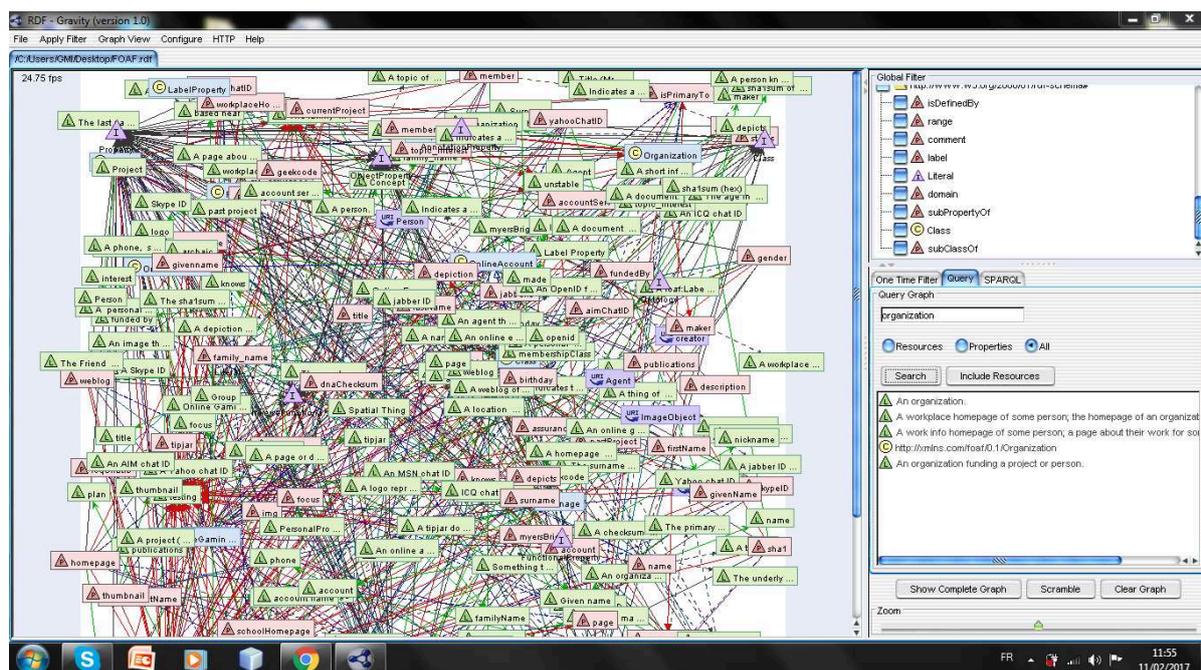


Figure 9. Graphe généré à partir de l'ontologie FOAF à l'aide de RDF Gravity.

Les membres du groupe GY répondent aux questions en utilisant **WebVOWL**. Nous le choisissons pour deux raisons principales. Premièrement, il est **le plus proche travail de Memo Graph**. Il offre une visualisation, sous forme de graphe, destinée aux utilisateurs moins familiers avec les ontologies. Deuxièmement, **nous considérons les travaux précédents**. Par exemple, [Lohmann et al., 2014] évaluent WebVOWL en le comparant avec SOVA et GrOWL. Les auteurs utilisent aussi l'ontologie FOAF (c'est pour cette raison que nous choisissons d'effectuer cette évaluation en utilisant l'ontologie FOAF). L'évaluation confirme que leur outil **de visualisation d'ontologies** est intuitif et facile à utiliser. La Figure 10 montre le graphe généré. Nous utilisons la fonctionnalité de la recherche (nous cherchons aussi la classe "Organization").

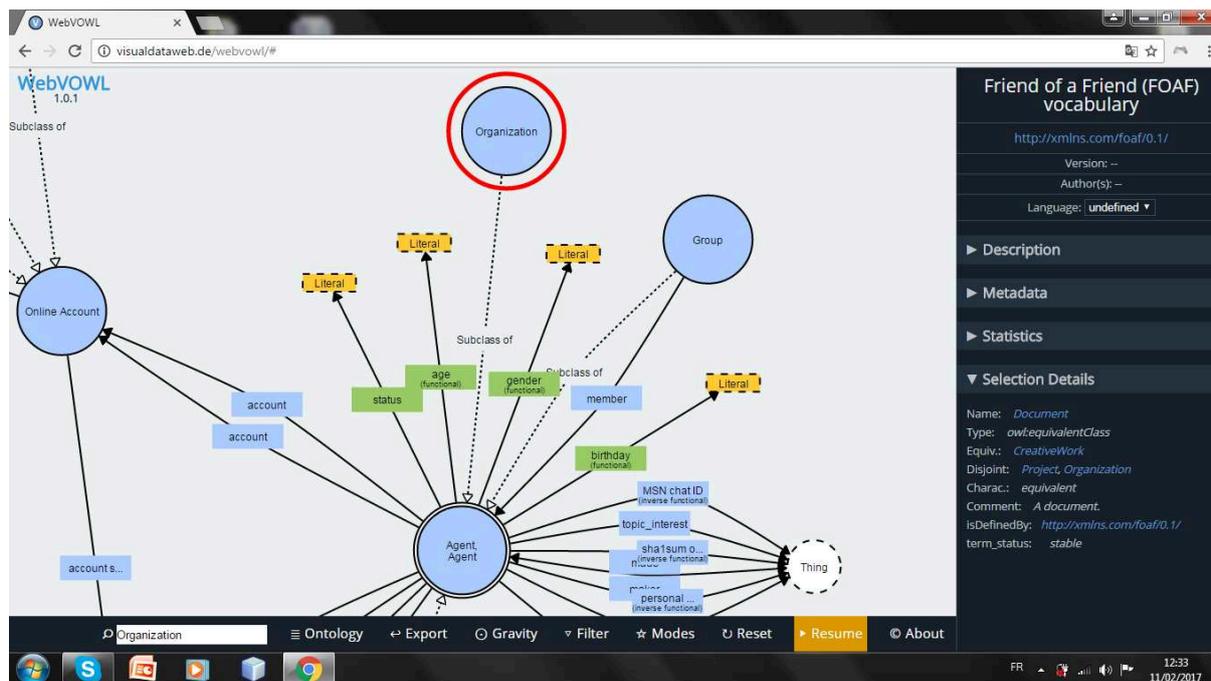


Figure 10. Graphe généré à partir de l'ontologie FOAF à l'aide de WebVOWL.

Chaque participant des trois groupes est invité à répondre à ces quatre questions suivantes :

- **Question 1** : Quelle est la classe ayant le plus grand nombre de connexions avec les autres nœuds (les propriétés d'objets) ?
- **Question 2** : Quelles sont les propriétés de type de données de la classe « Person » ?
- **Question 3** : Quelles sont les propriétés d'objets de la classe « Agent » ?
- **Question 4** : Quelles sont les sous-classes de la classe « Online Account » ?

Pour chaque question, nous donnons au participant 5 minutes pour répondre à la question. Si le participant dépasse cet intervalle de temps, nous considérons que sa réponse est fautive (« échec »). Les temps moyens d'exécution (en minutes : secondes) des différents groupes et les nombres d'« échec » pour chaque question sont présentés dans le Tableau 5.

Tableau 5. Résultats de l'étude quantitative de l'évaluation de la performance de Memo Graph avec des experts du domaine.

	GX (RDF Gravity)		GY (WebVOWL)		GZ (Memo Graph)	
	Temps moyen	Nombre d'« échec »	Temps moyen	Nombre d'« échec »	Temps moyen	Nombre d'« échec »
Question 1	02:17	4	01:12	0	01:07	0

Question 2	04:18	4	00:21	0	00:19	0
Question 3	04:54	4	00:36	0	00:29	0
Question 4	02:07	4	00:21	0	00:21	0
Moyenne globale/ Total des « échec »	03:24	16	00:37	0	00:34	0

Toutes les tâches effectuées à l'aide de Memo Graph sont terminées dans le délai de cinq minutes. Tandis que seize tâches, effectuées avec RDF Gravity, sont enregistrées comme « échec ».

En moyenne, les membres du groupe GZ (Memo Graph) prennent 0:34 minute pour répondre aux quatre questions posées. Les membres du groupe GX (RDF Gravity) prennent 2:50 minutes plus de temps pour terminer les tâches demandées. Les membres du groupe GZ (Memo Graph) et GY (WebVOWL) prennent environ le même temps global pour répondre aux questions.

Ces deux constatations confirment bien que Memo Graph est, comparativement, un outil de visualisation d'ontologies performant.

Seulement, quatre membres du groupe GX (RDF Gravity) répondent correctement aux questions dans le délai de cinq minutes. Au début de la session, ils appliquent des filtres pour alléger le graphe généré et le rendre plus lisible. Les autres participants ne peuvent pas résoudre les tâches demandées.

Pour la première question, les membres du groupe GZ (Memo Graph) et GY (WebVOWL) terminent avant environ une minute relativement aux membres du groupe GX (RDF Gravity). Ce décalage temporel s'explique par le fait que les visualisations générées avec Memo Graph et WebVOWL sont basées sur un algorithme de champs de forces. Ce dernier arrange les nœuds les plus connectés au milieu de l'écran.

Pour la deuxième question et la troisième question, Memo Graph et WebVOWL ont à peu près la même moyenne des temps d'exécution. RDF Gravity présente une moyenne des temps d'exécution à peu près quatre fois plus longue que les autres outils de visualisation d'ontologies. Cet outil est moins efficace, car il ne surligne pas le nœud recherché dans le graphe généré. Ainsi, l'utilisateur prend plus de temps pour effectuer une recherche visuelle du nœud concerné.

3.4.1.2. Étude qualitative

Chaque participant est invité à remplir un questionnaire post-session pour évaluer qualitativement la performance de l'outil de visualisation d'ontologies qu'il a utilisé. Les participants expriment leur accord ou leur désaccord sur une échelle de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord). Le questionnaire couvre les critères suivants : « réaction globale », « clarté », « techniques d'interaction », « recherche », « temps d'exécution » et « passage à l'échelle ». Le Tableau 6 résume les résultats de cette étude.

Tableau 6. Résultats de l'étude qualitative de l'évaluation de la performance de Memo Graph avec des experts du domaine.

Qualitative feedback	GX (RDF Gravity)	(GY) WebVOWL	GZ (Memo Graph)
En général, est-ce que vous êtes satisfait de la performance de l'outil de visualisation d'ontologies que vous utilisez ?	2,25	4,75	4,87
Est-ce que la visualisation générée est lisible et compréhensible ?	1	4,5	5
Est-ce que c'est facile à distinguer entre les classes, les propriétés d'objets et les propriétés de type de données ?	2,75	5	5
Est-ce que les techniques d'interaction proposées par l'outil de visualisation d'ontologies que vous utilisez répondent à mes attentes ?	3	4,75	4,87
Est-ce que vous êtes satisfait du résultat de la recherche ?	1,5	5	5
Est-ce que le temps de réponse répond à vos attentes ?	4,5	5	4,75
Est-ce que vous pensez que l'outil de visualisation d'ontologies que vous utilisez gère bien les bases de connaissances à large échelle ?	1	3,37	4,5
Moyenne	1,96	4,62	4,85

Les résultats issus de la phase « étude qualitative » confirment bien les résultats issus de la phase « étude quantitative ».

3.4.1.3. Pensée à voix haute

Tous les participants sont invités à utiliser librement Memo Graph et à donner leur avis en réfléchissant à haute voix. Ils sont invités à visualiser et à explorer l'ontologie FOAF et le jeu de données ouvertes liées à large échelle DBpedia.

Nous n'aidons pas les membres du groupe GX et GY à utiliser Memo Graph. Le but est d'évaluer si ce dernier est auto-explicatif ou non. Nous les guidons seulement à travers quelques indices qui décrivent les principales fonctionnalités de Memo Graph (par exemple : la facilité d'utilisation, le résumé de la visualisation, l'utilisation des photos pour la représentation des nœuds, la distinction visuelle des différents éléments de la visualisation, etc.). Les participants explorent les visualisations générées en groupes de trois ou quatre, pendant environ une quinzaine de minutes. Ils discutent leurs opinions les uns avec les autres. Nous enregistrons environ un total de 300 interactions. En général, les retours des participants sont encourageants :

- Tous les participants des groupes GX et GY découvrent de façon autonome comment utiliser Memo Graph. Ils confirment qu'il est auto-explicatif ;
- Tous les participants confirment que les visualisations générées sont lisibles et compréhensibles ;
- Tous les participants n'ont aucune difficulté à distinguer visuellement entre les différents éléments de la visualisation ;
- La plupart des participants apprécient l'utilisation des photos pour la visualisation des classes et des instances ;
- La plupart des participants apprécient le fait que les nœuds fortement connectés sont placés plus au centre de la visualisation, tandis que les nœuds les moins connectés sont affichés à la périphérie ;
- La plupart des participants affirment que Memo Graph offre plusieurs techniques d'interaction ;
- La plupart des membres du groupe GX apprécient que Memo Graph supporte la fonctionnalité de la recherche en mettant en évidence l'élément concerné dans la visualisation ;

- Peu de participants utilisent le mécanisme de zoom. En tenant compte de ce résultat, nous pensons que Memo Graph nécessite une manière plus claire pour montrer que la fonction de zoom est disponible (c'est-à-dire, via des boutons « zoomer » et « dézoomer ») ;
- La plupart des participants apprécient que Memo Graph offre une visualisation vocale ;
- Quelques participants confirment que la fonctionnalité de la recherche via la modalité de la reconnaissance vocale n'est pas toujours utile (par exemple : la propriété d'objet « SkypeID » est écrite « skype id », ce qui ne correspond à aucun élément.) ;
- Tous les participants apprécient la visualisation itérative et incrémentale de DBpedia.

3.4.2. Évaluation de l'utilisabilité

Tous les participants remplissent un questionnaire pour décrire leurs opinions globales sur l'utilisabilité des visualisations générées à l'aide de Memo Graph. Nous avons eu recours au questionnaire SUS. Le Tableau 7 résume les résultats.

Tableau 7. Résultats du questionnaire SUS pour l'évaluation de l'utilisabilité de Memo Graph avec des experts du domaine.

Question SUS	La moyenne
Je pense que j'aimerais utiliser fréquemment ce système	4,75
J'ai trouvé ce système inutilement complexe	1,37
J'ai trouvé ce système facile à utiliser	4,87
Je pense que j'aurais besoin du support d'un spécialiste pour utiliser ce système	1
J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce système sont bien intégrées	4,5
J'ai trouvé ce système trop incohérent	1
Je pense que ce système sera facile à apprendre pour beaucoup de personnes	4,37
J'ai trouvé ce système très contraignant à utiliser	1
Je me suis senti(e) en confiance lorsque j'ai utilisé ce système	4
J'ai dû apprendre beaucoup de choses avant de me sentir familiarisé(e) avec ce système	1,5
Total	36,62

Le score SUS est égal à 91,55 ($36,62 * 2,5$). **Ce dernier indique un très bon niveau d'utilisabilité.**

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons **notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph qui offre une visualisation accessible aux malades d'Alzheimer.**

Cette proposition est motivée par le fait que CAPTAIN MEMO a besoin de générer et d'éditer le graphe de la famille et de l'entourage du patient, à partir de l'ontologie MemoFuzzyOnto qui structure sa base de connaissances. Pour assurer l'accessibilité et la compréhensibilité du graphe généré, nous nous basons sur **notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie et notre approche IKIEV. Cette approche permet une extraction et une visualisation incrémentale du résumé de l'ABox de l'ontologie.**

Comme effet secondaire désirable, Memo Graph peut être intégré dans d'autres applications pour des utilisateurs non-connaisseurs du domaine. De plus, il peut être utilisé en tant qu'application autonome par des experts du domaine. C'est pour cela que nous améliorons Memo Graph pour visualiser **les données ouvertes liées**. Grâce à notre approche IKIEV, Memo Graph permet de trouver un équilibre entre une entrée à **large échelle** et le fait d'offrir une visualisation lisible et compréhensible.

Nous évaluons la performance et l'utilisabilité de Memo Graph. Cette évaluation fait intervenir des experts du domaine. Les résultats sont encourageants.

Comme objectif principal, nous intégrons Memo Graph dans le prototype de CAPTAIN MEMO. Puis, nous évaluons l'accessibilité de la visualisation générée avec des malades d'Alzheimer. Ces deux points sont présentés en détail dans le septième chapitre.

CHAPITRE 4 :

**Qualité des données saisies dans
CAPTAIN MEMO : les différents
types d'imperfection**

4.1. Introduction

Le but de ce chapitre est d'identifier **les différents types d'imperfection qui sont liés aux données saisies par le patient d'Alzheimer et/ou un utilisateur de son entourage dans le cadre de CAPTAIN MEMO** et de proposer **une méthodologie générale pour l'estimation et l'amélioration de la qualité des données.**

Nous présentons et analysons un échantillon de données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO par une malade d'Alzheimer et sa fille. **Cet échantillon fictif a pour but de montrer que ces données sont imparfaites.** En effet, le malade d'Alzheimer souffre de plusieurs incapacités cognitives et sensorielles. À cause de ces déclin, les données saisies par ce dernier sont sujettes à différentes formes d'imperfection. Par exemple, il peut saisir une donnée fautive à cause des pertes de mémoire ou il sélectionne une donnée incorrecte d'une liste déroulante à cause d'une baisse de ses capacités visuelles. De plus, les données saisies par un utilisateur de l'entourage du patient sont aussi imparfaites. Par exemple, il ne connaît pas forcément toutes les données liées au propriétaire de la prothèse (incomplétude des données).

Pour la prise en compte de l'imperfection des données saisies, la compréhension de ses différentes formes est fondamentale. L'état de l'art montre que chacune des typologies de l'imperfection des données dépend du domaine, certaines correspondent mieux à une réalité que d'autres. Cependant, à notre connaissance, **il n'existe pas dans la littérature une typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer.** En nous basant sur cet état de l'art ainsi que les spécificités de notre prothèse de mémoire, nous proposons **notre propre typologie des éventuels types d'imperfection des données saisies par le malade ou un utilisateur de son entourage.**

L'imperfection des données affecte leurs qualités, et par la suite la qualité des services de CAPTAIN MEMO. Nous proposons une **méthodologie générale pour l'estimation et l'amélioration de la qualité des données.**

La suite du présent chapitre est structurée comme suit. Dans la section 4.2, nous élaborons un état de l'art qui aborde l'imperfection et la qualité des données. La section 4.3 présente l'analyse des éventuels types d'imperfection d'un échantillon de données saisies dans le cadre de notre prothèse de mémoire. La section 4.4 présente notre typologie de

l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO. La section 4.5 présente notre méthodologie pour l'estimation et l'amélioration de la qualité des données.

4.2. État de l'art

Ce présent état de l'art aborde deux volets : l'imperfection et la qualité des données.

4.2.1. Imperfection des données

Comme le mentionne Bernadette Bouchon-Meunier dans [Bouchon-Meunier, 1993], « les connaissances disponibles sur une situation quelconque sont généralement imparfaites ». Dans le contexte de CAPTAIN MEMO, le problème de l'imperfection des données s'accroît, car une partie de ces données est saisie par un malade d'Alzheimer.

Nous présentons quelques travaux sur les typologies de l'imperfection des données. Puis, nous citons les principales théories de la représentation et le traitement des données imparfaites.

4.2.1.1. Typologies de l'imperfection des données

Nous distinguons **les typologies génériques de l'imperfection des données et les typologies spécifiques de l'imperfection des données dans un domaine donné.**

4.2.1.1.1. Typologies génériques de l'imperfection des données

Depuis la littérature, nous identifions **quatre typologies génériques de l'imperfection des données** : la typologie de la non-précision des données selon [Niskanen, 1989], la typologie de l'imperfection des données selon [Bouchon-Meunier, 1995], la typologie de l'incertitude des données selon [Klir et Yuan, 1995] et la typologie de l'imperfection des données selon [Smets, 1997].

Typologie de la non-précision des données selon [Niskanen, 1989] : Niskanen propose une typologie de la non-précision des données, illustrée sur la Figure 11. Elle fait appel à quatre concepts : **l'incertitude, l'imprécision, l'ambiguïté et la généralité**. Selon l'auteur, l'incertitude est un concept mesurable lié à la notion de l'erreur, tandis que l'imprécision n'est pas mesurable. Il propose trois termes relatifs à la notion de l'imprécision : l'imprécision ontologique (les objets sont naturellement imprécis), l'imprécision linguistique (les objets ne sont pas définis précisément) et l'imprécision épistémologique (les objets ne

peuvent pas être perçus d'une manière précise). L'ambiguïté apparaît lorsque plusieurs points de vue existent sur le même phénomène du monde réel. La généralité est la représentation multiple de la réalité en fonction du niveau de détail.

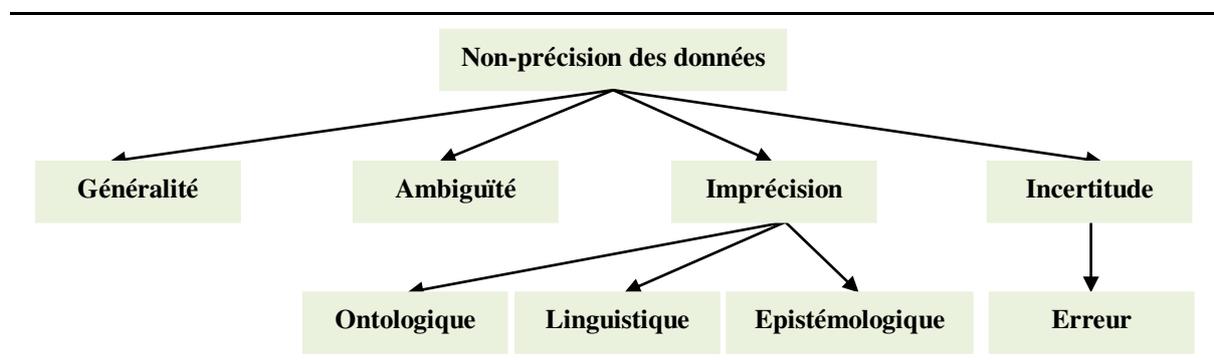


Figure 11. Typologie de la non-précision des données selon [Niskanen, 1989].

Typologie de l'imperfection des données selon [Bouchon-Meunier, 1995] : dans un premier ouvrage [Bouchon-Meunier, 1993], l'auteure distingue deux types d'imperfection : **l'incertitude et l'imprécision**. Dans son deuxième ouvrage [Bouchon-Meunier, 1995], elle distingue un troisième facteur de l'imperfection : **l'incomplétude**. Elle définit l'incertitude par la validité des données. L'imprécision des données est due au caractère vague ou approximatif de la sémantique utilisée. L'incomplétude est relative à des données lacunaires ou à l'absence des données. La Figure 12 illustre cette typologie de l'imperfection des données.

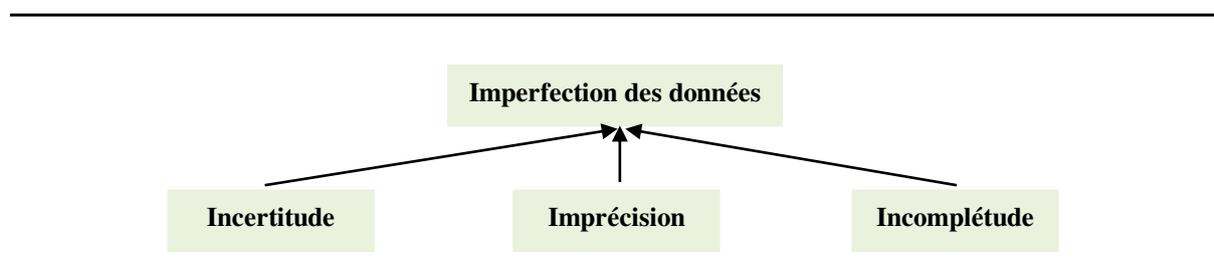


Figure 12. Typologie de l'imperfection des données selon [Bouchon-Meunier, 1995].

Typologie de l'incertitude des données selon [Klir et Yuan, 1995] : Klir et Yuan proposent une typologie de l'incertitude des données, présentée dans la Figure 13. L'incertitude se divise en deux classes : le flou et l'ambiguïté. L'ambiguïté fait référence au conflit et à la non-spécificité.

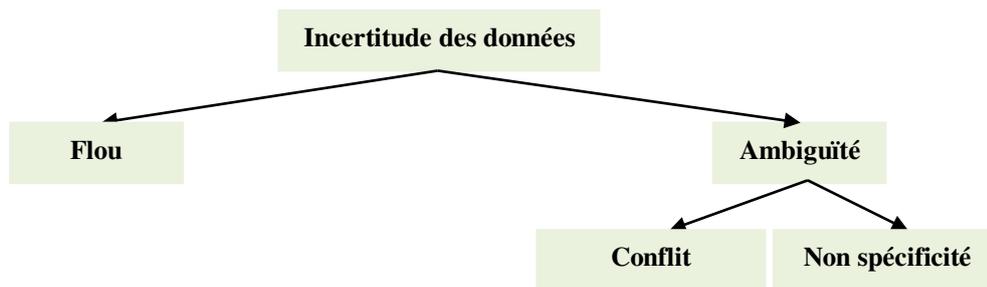


Figure 13. Typologie de l'incertitude des données selon [Klir et Yuan, 1995].

Typologie de l'imperfection des données selon [Smets, 1997] : Smets établit une classification de l'imperfection des données. Elle est éclatée en trois groupes : **l'imprécision, l'incohérence et l'incertitude**, comme le montre la Figure 14. L'imprécision est relative au contenu des données qui peuvent avoir ou non des erreurs, relevé d'un caractère approximatif ou vague (par exemple : « le mur mesure plus de deux mètres » [Smets, 1997]). L'incohérence est relative aux données conflictuelles et contradictoires (par exemple : « le mur est en pierre alors que le bâtiment est en bois »). L'incertitude est induite par des données subjectives (c'est-à-dire l'avis de l'observateur) ou objectives (c'est-à-dire les propriétés de la donnée).

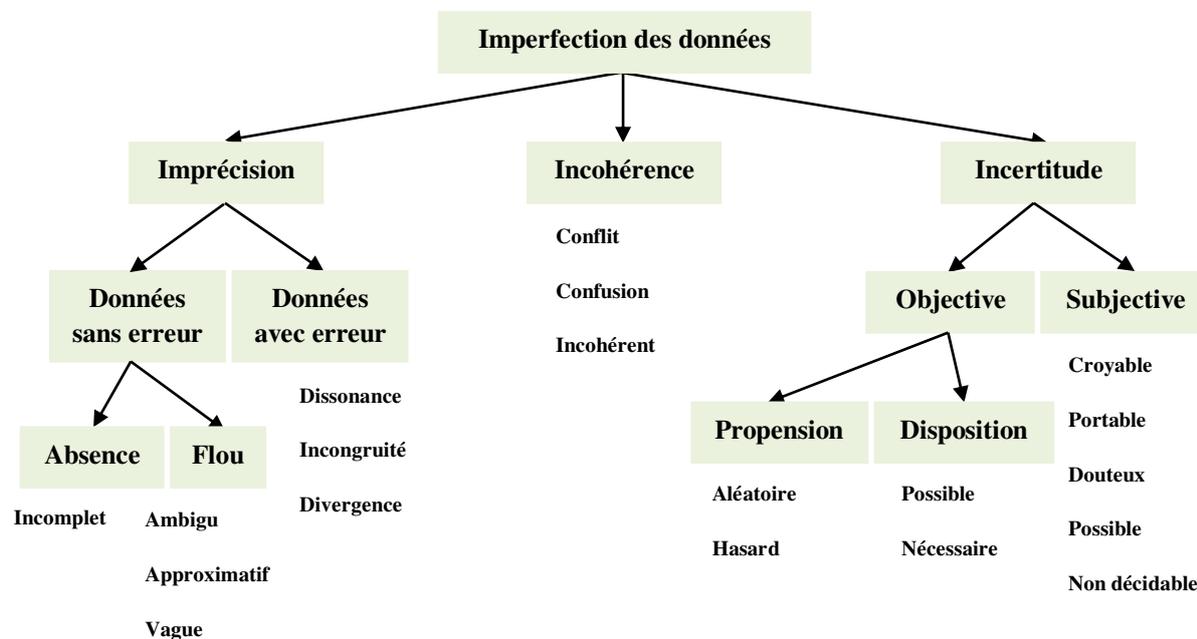


Figure 14. Typologie de l'imperfection des données selon [Smets, 1997].

4.2.1.1.2. Typologies spécifiques de l'imperfection des données dans un domaine donné

Depuis la littérature, nous identifions **quatre typologies de l'imperfection des données spécifique à un domaine donné** : la typologie de l'incertitude des données géographiques selon [Fisher et al., 2005], la typologie de l'imperfection d'un ensemble des données textuelles décrivant des objets ethnographiques selon [Olteanu et al., 2006], la typologie de l'imperfection des données financières selon [Casta, 2009] et la typologie de l'imperfection des données financières selon [Casta, 2009].

Typologie de l'incertitude des données géographiques selon [Fisher et al., 2005] : cette typologie est la plus utilisée dans la communauté de la donnée géographique [Zoghلامي, 2013]. Fisher et al. utilisent le concept de l'incertitude comme un chapeau qui englobe tous les autres concepts (autrement dit, il s'agit de l'imperfection), comme le montre la Figure 15. **Une donnée est bien ou mal définie**. Dans le cas où la donnée est bien définie, elle est soumise à **l'incertitude**. Dans les autres cas, la donnée est mal définie et l'imperfection de la donnée est due à **l'imprécision, l'ambiguïté et/ou l'incomplétude**. L'ambiguïté se produit lorsqu'il y a un doute sur la manière de définir un objet ou un phénomène. Deux types d'ambiguïtés sont reconnus à savoir **le désaccord et le manque de spécificité**.

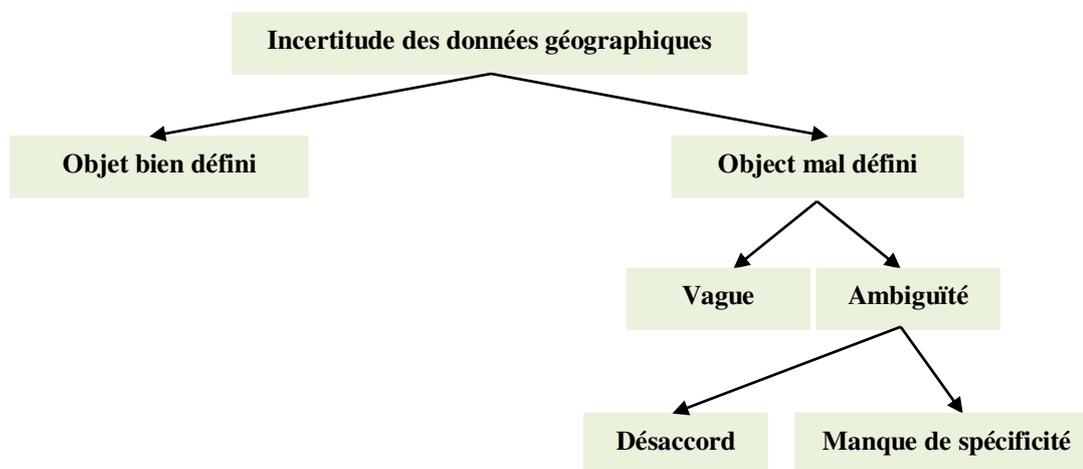


Figure 15. Typologie de l'incertitude des données géographiques selon [Fisher et al., 2005].

Typologie de l'imperfection d'un ensemble des données textuelles décrivant des objets ethnographiques selon [Olteanu et al., 2006] : Olteanu et al. se basent sur les travaux de [Fisher, 2003] et [Fisher et al., 2005] pour classifier l'imperfection d'un ensemble de données textuelles décrivant des objets ethnographiques. Quatre types d'imperfection sont distingués : **l'imprécision, l'incertitude, le niveau de détail et l'incomplétude**, comme le

montre la Figure 16. L'imprécision concerne « la difficulté d'exprimer clairement et précisément les connaissances ». L'incertitude concerne « un doute sur la validité d'une information ». Le niveau de détail « s'agit des connaissances présentées à plusieurs granularités ». L'incomplétude fait référence à « l'absence de l'information ».

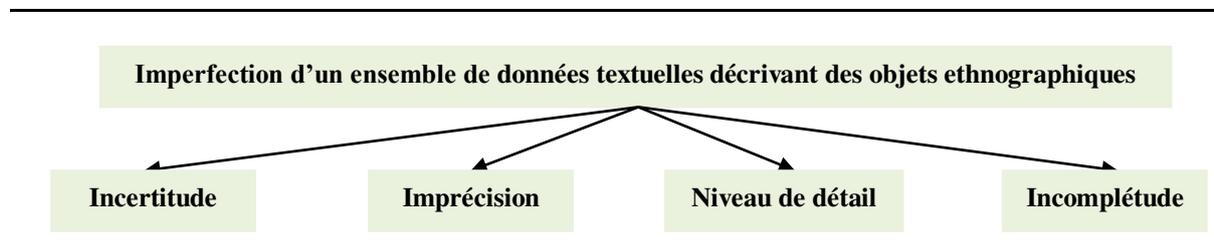


Figure 16. Typologie de l'imperfection d'un ensemble de données textuelles décrivant des objets ethnographiques selon [Olteanu et al., 2006].

Typologie de l'imperfection des données financières selon [Casta, 2009] : Casta établit une typologie de l'imperfection des données issues de l'activité économique, illustrée dans la Figure 17. Elle est éclatée en **incertitude, imprécision et erreur**. L'incertitude désigne « l'état d'un agent qui n'a aucune connaissance sur l'avenir car l'ensemble des événements possibles, ou éventualités, comprend plus d'un élément et ces éléments n'obéissent pas à un déterminisme strict et connu ». L'imprécision désigne « un manque de rigueur ou d'une contrainte opérationnelle qui affecte la mesure ou, le plus souvent dans les sciences sociales, d'une ambiguïté inhérente à la formulation des concepts ». L'erreur est définie par « la dispersion des gains et des pertes probables autour de leur moyenne ».

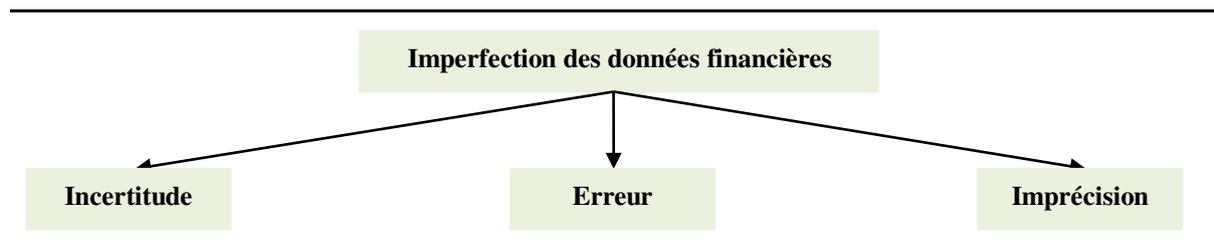


Figure 17. Typologie de l'imperfection des données financières selon [Casta, 2009].

Typologie de l'imperfection des données archéologiques selon [Desjardin et al., 2012] : les auteurs se fondent sur la typologie de [Fisher et al., 2005] pour proposer une typologie de l'imperfection adaptée au contexte des données archéologiques. Ils classifient les imperfections en **incertitude, imprécision, ambiguïté et incomplétude**, comme le montre la Figure 18. L'incertitude est le fait qu'« il y a un doute sur la validité de la connaissance ». L'imprécision est la « difficulté à exprimer clairement les connaissances ». L'objet n'est pas

suffisamment clairement défini. Il y a un manque de précision dans la définition de l'objet. L'ambiguïté est le fait qu'« il y a une difficulté à être d'accord ». Il y a conflit si au minimum deux classifications contradictoires pour un unique objet sont possibles. Lorsqu'une définition d'une relation ou d'un objet peut amener à plusieurs sens, ou lorsque l'échelle de l'analyse est susceptible d'amener à de multiples interprétations, c'est la non-spécificité. L'incomplétude est le fait qu'« il y a des connaissances manquantes ou partielles ».

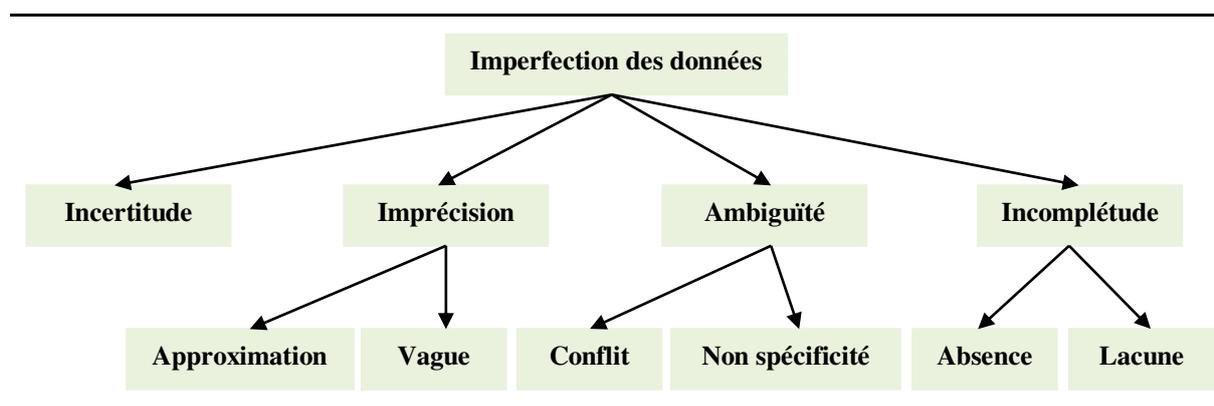


Figure 18. Typologie de l'imperfection des données archéologiques selon [Desjardin et al., 2012].

4.2.1.1.3. Discussion

Dans la littérature, il existe de **nombreuses typologies de l'imperfection des données**. Cependant, **la plupart des typologies restent discutables selon le domaine, certaines correspondent mieux à une réalité que d'autres**. À notre connaissance, **il n'existe pas une typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer**.

Nous constatons qu'il n'y a pas réellement à ce jour de terminologies et de définitions définitivement établies relatives aux termes employés pour qualifier les **données imparfaites** (par exemple : l'incertitude, l'imprécision, la vague, l'erreur, etc.).

Certaines **similitudes peuvent être relevées dans les typologies citées** dans la section précédente. Nous remarquons que la majorité de ces typologies font appel à trois concepts communs : **l'imprécision, l'incertitude et l'incomplétude**.

Les types d'imperfection sont interdépendants. « Les incomplètes entraînent des incertitudes [...], les imprécisions peuvent de même être associées à des incomplètes, et elles engendrent des incertitudes au cours de leurs manipulations » [Bouchon-Meunier, 1995]. Selon [Smets, 1998], l'imprécision fait toujours référence à l'incomplétude. L'imprécision peut être la source de l'incertitude, mais pas nécessairement [Smets, 1998]. Enfin, une donnée

peut être liée à plusieurs types d'imperfection. Par exemple, « une donnée peut très bien être imprécise et certaine, précise et incertaine ou imprécise et incertaine » [Gavignet, 2016].

4.2.1.2. Représentations formelles des données imparfaites

Afin de manipuler les données imparfaites, de nombreux cadres théoriques sont formalisés dans la littérature [De Runz, 2011] tels que **la théorie des probabilités** [Cowell, 1999], **la théorie des ensembles flous** [Zadeh, 1965], **la théorie des possibilités** [Zadeh, 1978], **la théorie des fonctions de croyance** [Shafer, 1976], **la théorie des ensembles grossiers** [Pawlak, 1982] [Duckham et al., 2001] et **la théorie de l'évidence** (théorie des fonctions de croyance ou théorie de Dempster-Shafer) [Dempster, 1968] [Shafer, 1976]. Une description complète de ces théories se trouve dans [Bouchon-Meunier, 1995]. Toutes ces théories permettent de modéliser les données et leurs imperfections de manières complémentaires. Ces théories se regroupent sous la terminologie théories de l'imparfait ou théories de l'incertain. Nous préférons la dénomination **théories de l'imparfait**.

Généralement, **la théorie des probabilités est considérée comme une théorie de la représentation de l'incertitude**, alors que **la théorie des ensembles flous s'intéresse à la représentation de l'imprécis**. Les théories des possibilités et de l'évidence peuvent être vues comme des approches mixtes qui tentent de faire le pont entre l'imprécision et l'incertitude. Elles permettent une bonne modélisation pour la résolution de l'ambiguïté. La théorie de l'évidence permet de modéliser l'ignorance. Cette distinction entre les champs des applications de ces théories est formelle³⁰.

4.2.2. Qualité des données

Les données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO sont sujettes à différentes formes d'imperfection. Cependant, « l'imperfection de l'information impacte sur la qualité des données » [De Runz, 2008]. Dans cette section, nous abordons, de façon synthétique, la thématique de la qualité des données.

La qualité des données est un domaine de recherche qui suscite depuis longtemps un vif intérêt. Depuis la fin des années 60, la notion de la qualité des données est étudiée par les statisticiens [Fellegi et Sunter, 1969]. Depuis les années 90, les sciences de l'information ont commencé à formaliser la problématique de la **mesure** et de l'**amélioration** de la qualité des données [Aubin, 2012].

³⁰ dans les usages et pratiques, elle n'est pas évidente

4.2.2.1. Définition

Dans la littérature, la définition la plus citée de la qualité des données est celle de [Juran et Gryna, 1980]. Elle est définie comme “**fitting to use**”. Selon [Wang et Strong, 1996], ce concept est défini comme « les données qui sont adaptées à l’usage des consommateurs de données » ou plus formellement comme énoncé dans la norme ISO 9000:2015³¹, « La qualité des produits et services d’un organisme est déterminée par la capacité à satisfaire les clients et par l’impact prévu et imprévu sur les parties intéressées pertinentes ». Dans le domaine géographique, elle est définie comme « la précision et l’exactitude spatiale des données collectées » [Rodriguez, 2010].

4.2.2.2. Dimensions de la qualité

La qualité des données est représentée comme une **collection de dimensions** [Aubin, 2012]. Une dimension peut être appelée aussi catégorie, critère, facteur, paramètre ou attribut. Une **dimension de la qualité** est une extension de la donnée, et est souvent définie de **façon qualitative**. Les dimensions de la qualité sont définies au sein d’un **modèle qualité**. Chaque dimension peut être déclinée en plusieurs **sous-dimensions**. Les sous-dimensions ne fournissent pas des mesures quantitatives et sont donc associées à une ou plusieurs **métriques** permettant une **estimation quantitative de la qualité**. Pour chaque métrique, une ou plusieurs **méthodes de mesure** sont fournies. Dans certains travaux, les termes dimension et métrique ne sont pas différenciés.

Dans la littérature, **il existe un nombre considérable d’approches définissant les différentes dimensions de la qualité au sein d’un modèle qualité**. Les approches les plus citées sont les suivantes : [Wang et Strong, 1996], [Jarke et Vassiliou, 1997], [Calabretto et al., 1998], [Berti, 1999], [Naumann et Roker, 2000], [Zhu et Gauch, 2000], [Marotta, 2002] et [Akoka et al., 2008]. Le Tableau 8 résume ces approches.

Les auteurs de [Naumann et Roker, 2000] identifient trois approches d’analyse des dimensions de la qualité des données :

- **Approche orientée sémantique**, basée seulement sur la signification des dimensions. Il s’agit d’une approche où les dimensions sont examinées de façon générale, c’est-à-dire séparées de tout cadre des données ;

³¹Systèmes de management de la qualité -- Principes essentiels et vocabulaire [Organisation internationale de normalisation]

- **Approche orientée traitement**, classant les dimensions de la qualité des données selon leurs déploiements dans les différentes étapes du traitement de la donnée ;
- **Approche orientée objectif**, caractérisée par une définition des objectifs de la qualité à atteindre et un classement des dimensions selon les objectifs définis.

Tableau 8. Modèles qualité.

Modèle qualité	Caractérisation de la qualité des données
[Wang et Strong, 1996]	Approche orientée sémantique : quatre catégories, treize dimensions qualité de données.
[Jarke et Vassiliou, 1997]	Approche orientée objectif : cinq facteurs qualité des entrepôts de données.
[Calabretto et al., 1998]	Approche orientée sémantique : trois critères de qualité d'information, huit critères de qualité des documents.
[Berti, 1999]	Approche orientée sémantique : quatre catégories, trente-deux critères de qualité des données multisources.
[Naumann et Roker, 2000]	Approche orientée traitement : trois classes d'évaluation des critères, onze critères de qualité de données.
[Zhu et Gauch, 2000]	Approche orientée sémantique : cinq critères de qualité des pages web.
[Marotta, 2002]	Approche orientée traitement : deux points de vue : système et utilisateur, six catégories, trente et un critères.
[Akoka et al., 2008]	Quatre dimensions de qualité pour les systèmes d'intégration des données.

Il n'existe pas de classification universelle des dimensions de la qualité des données [Aubin, 2012]. Ces classifications dépendent des besoins du projet, du contexte de l'étude et de l'orientation que l'analyste veut donner à son évaluation [Ben Hassine, 2014]. Selon [Berti-Equille, 2004], la dimension peut prendre un sens selon les spécificités du domaine d'application. D'après [Aubin, 2012], « l'inconvénient de ces approches ne laisse que relativement peu de choix à l'utilisateur, sans pour autant l'aider à construire un ensemble cohérent et minimal de critères de qualité ou bien l'assister dans leur spécification ».

Nous nous limitons à la représentation du modèle qualité de [Wang et Strong, 1996], il a servi comme une base pour la plupart des autres modèles qualité. Ce modèle est présenté dans la Figure 19. Après une première analyse de la notion de la qualité, Wang et Strong proposent 179 dimensions pour évaluer la qualité des données. Comme ce nombre est important, ils affinent leur analyse et ils réduisent le nombre de dimensions à treize. Elles sont regroupées en quatre catégories. La première correspond aux dimensions intrinsèques de la qualité des données, c'est-à-dire les dimensions indépendantes du contexte de l'application. La seconde

catégorie regroupe les dimensions contextuelles de la qualité, c'est-à-dire les dimensions dépendantes du contexte de l'application. La troisième catégorie contient les dimensions de la qualité décrivant la représentation des données en vue de leur facilité d'utilisation. La quatrième catégorie regroupe les dimensions de la qualité traduisant l'accessibilité des données.

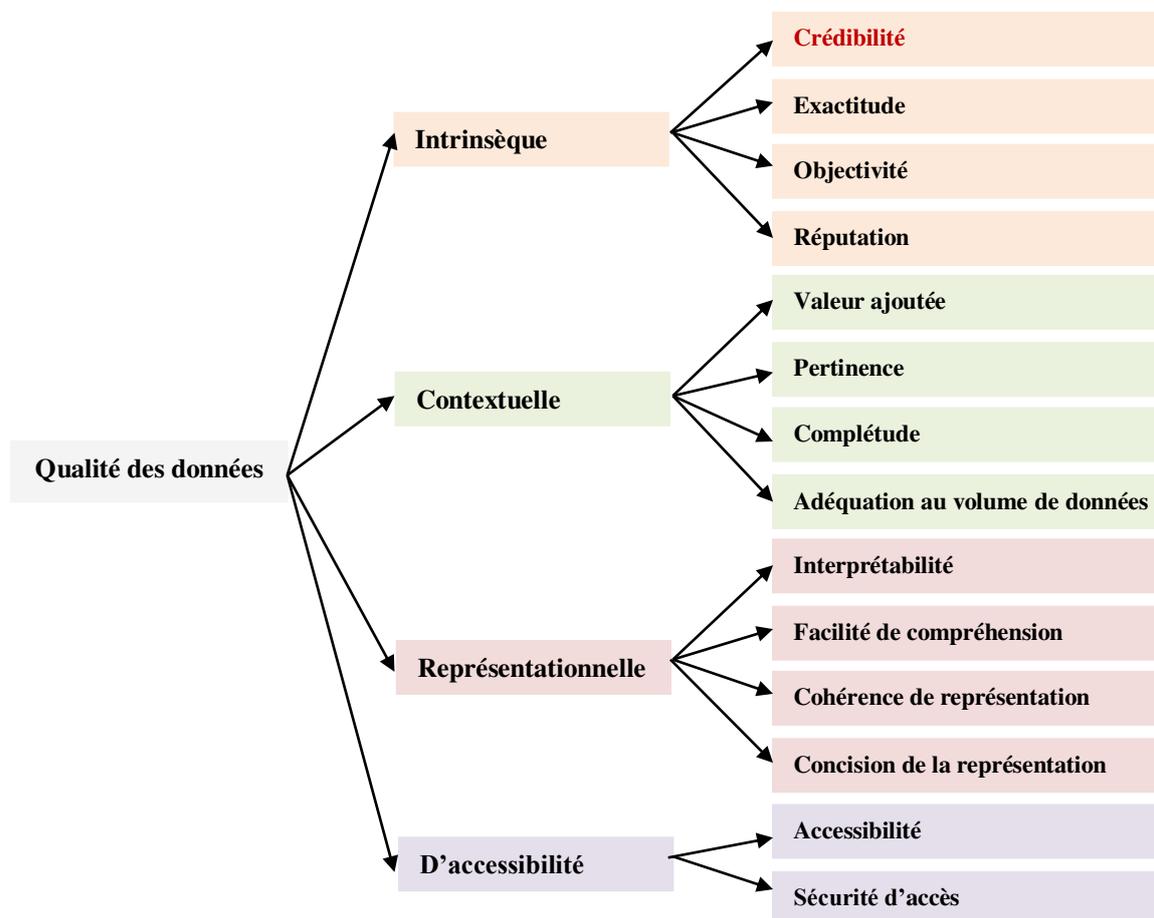


Figure 19. Modèle qualité de [Wang et Strong, 1996].

4.2.2.3. Importance de la gestion de la qualité des données

La gestion de la qualité des données (Data Quality Management) est la capacité à fournir des données fiables capables de répondre aux besoins techniques et métiers des utilisateurs.

Selon [Aubin, 2012], « la qualité de données ne se limite donc pas seulement à aider les organisations à charger des données correctes dans leurs systèmes d'information ; elle permet également de se débarrasser des données erronées, corrompues ou dupliquées ».

4.2.2.4. Méthodologies pour l'évaluation et l'amélioration de la qualité de données

Une méthodologie pour l'évaluation et l'amélioration de la qualité de données « peut être considérée comme l'ensemble de directives et des techniques décrivant le contexte d'application de l'information, ainsi que la définition de processus pour évaluer et améliorer la qualité des données » [Rodriguez, 2010]. Il existe **plusieurs** approches pour l'évaluation de la qualité des données. Parmi ces approches, nous citons : Total Data Quality Management (TDQM) [Wang et Strong, 1996], Total Quality data Methodology (TQdM) [English, 1999], Istat [Falorsi et al., 2006], A Methodology for information quality assessment (AIMQ) [Lee, 2002], Data Quality Assessment DQA [Pipino, 2002], Cost-effect of Low Data Quality (COLDQ) [Loshin, 2004], Data Quality in Cooperative IS (DaQuinCIS) [Scannapieco, 2004], Quality Assessment on Financial Data (QAFD) [De Amicis et Batini, 2004], Data Quality Meta Data Warehouse (DQMDW) [Maydanchik, 2007] et Complete Data Quality methodology (CDQ), [Batini, 2006]. **La plupart de ces approches sont proposées dans un contexte bien précis.** Par exemple, Istat vise principalement l'étude des données de type « Adresses/Localisation » dans le cadre d'une structure organisationnelle compliquée composée d'agences locales, centrales et périphériques. TDQM, TQdM et DQMDW sont proposées dans le contexte de l'intégration des données.

L'approche TDQM est la plus utilisée et elle sert de référence pour la plupart des autres méthodologies. C'est pour cela, c'est celle qui est présentée par la suite. Elle est fondée sur une amélioration continue de la qualité par un cycle du type « Définir, Mesurer, Analyser et Améliorer », comme le montre la Figure 20. Elle se résume en quatre étapes :

- **Définir** : les auteurs définissent les dimensions de la qualité des données ;
- **Mesurer** : après avoir défini la qualité des données, celle-ci est mesurée afin de pouvoir la quantifier et l'utiliser ;
- **Analyser** : les mesures de l'étape précédente sont interprétées. Cette étape est responsable de l'identification des dimensions de la qualité déficitaires (ayant un faible niveau de qualité). De plus, sont également identifiées les sources de ces problèmes de qualité ;
- **Améliorer** : à cette étape sont entreprises les actions nécessaires pour diminuer les problèmes de qualité.

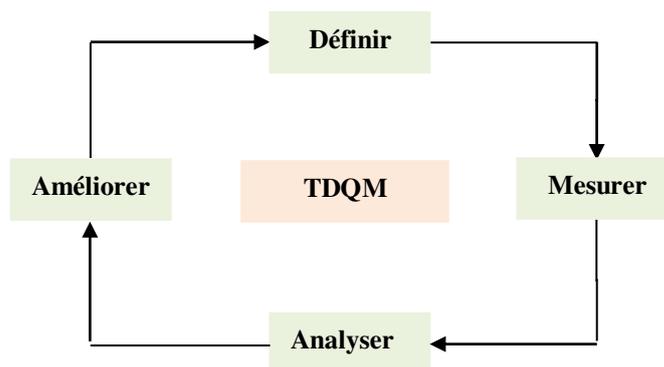


Figure 20. Méthodologie TDQM pour l'amélioration continue de la qualité des données [Wang et Strong, 1996].

4.3. Échantillon de données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO

Dans cette section, nous présentons un échantillon fictif de données saisies par des malades d'Alzheimer et leur entourage dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Puis, nous dégagons les éventuels types d'imperfection liés à ces données.

4.3.1. Présentation de l'exemple motivant

Dans cet exemple fictif mais établi à partir d'échantillons issus des différents tests d'utilisation de notre prototype, nous supposons que Madame Marie Courtois (malade d'Alzheimer, premier stade, 69 ans) entre des données relatives à ses parents au premier degré (ses enfants, son père et sa mère), ses parents au second degré (ses petits-enfants, ses grands-parents, ses frères et ses sœurs), son (ses) conjoint(s), son (ses) oncle(s) et sa (ses) tante(s), avec seulement deux attributs : la date de naissance (jour / mois / année) et le métier. Dans un second temps, nous supposons que sa fille, Madame Nathalie Dubois, vérifie la véracité des données saisies par sa mère et cherche à compléter les données manquantes. La Figure 21 montre cet échantillon de données. Les données marquées avec la couleur rouge sont fausses (les corrections sont marquées avec la couleur verte). Les données marquées en violet sont saisies par la fille.

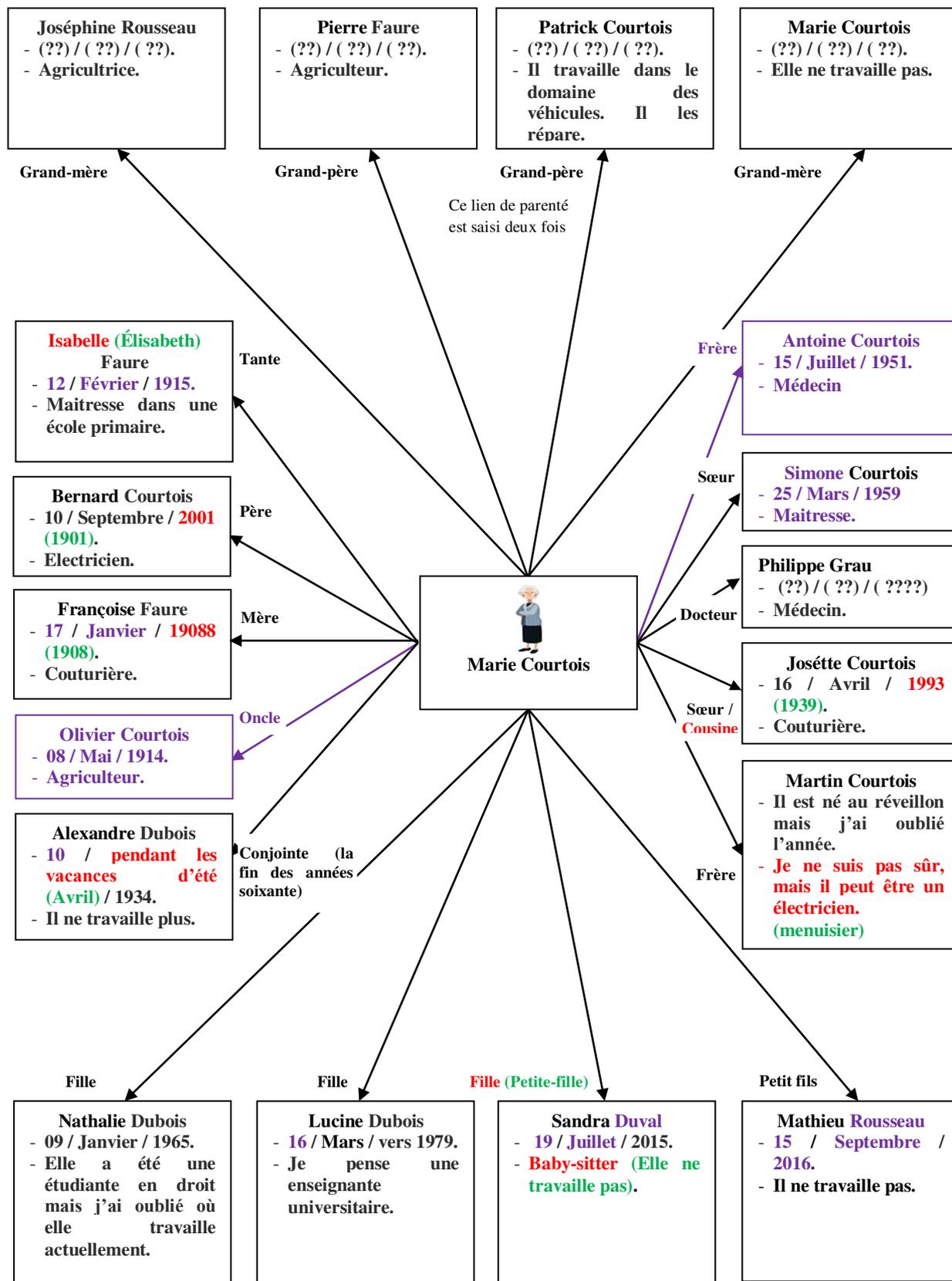


Figure 21. Échantillon fictif de données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.

4.3.2. Analyse : dégager les différents types d'imperfection

Nous analysons les données saisies par Marie Courtois et sa fille. Nous distinguons plusieurs types d'imperfection. Nous les détaillons comme suit.

Des données fausses non vraisemblables par rapport au sens commun : nous notons l'existence de données fausses (marquées en rouge) qui ne sont pas vraisemblables par rapport au sens commun. Par exemple, l'année de naissance de Josette Courtois n'est pas vraisemblable par rapport au sens commun car il est impossible que sa maman Françoise Courtois soit à l'époque tombée enceinte à l'âge de 85 ans (ou bien le fait que Josette soit sa mère est faux). Un autre exemple concerne l'année de naissance de Bernard Courtois. En effet, il est impossible que le père, ayant une fille née en 1948 et une autre née en 1939, soit né en 2001. De plus, la donnée qui porte sur le lien de parenté « fille » entre Marie Courtois et Sandra Duval n'est pas vraisemblable par rapport au sens commun. La différence d'âge est égale à 68 ans.

Des données fausses vraisemblables par rapport au sens commun : la patiente saisit des données fausses vraisemblables par rapport au sens commun. Par exemple, sa fille déclare faux le lien « cousine » entre Marie Courtois et Josette Courtois. Cependant, cette donnée respecte les règles du sens commun (par exemple : Josette Courtois est une femme.).

Des données incertaines d'après la malade d'Alzheimer : Ce sont des données dont Marie Courtois doute de leur véracité. Par exemple, la patiente doute des données qui concernent le métier de Martin Courtois (« je ne suis pas sûre, mais peut-être un électricien ») et le métier de sa fille Lucine Dubois (« je pense une enseignante universitaire »).

Des données fausses liées à la fiabilité de la malade d'Alzheimer : nous constatons l'existence de données fausses saisies par Marie Courtois en tant que vraies, mais en réalité elles sont fausses. La fausseté de ces données est due aux troubles de la mémoire causés par la maladie d'Alzheimer. Par exemple, elle saisit que le mois de naissance d'Alexandre Dubois est « pendant les vacances d'été ». Cependant, sa fille affirme que cette donnée est fausse.

Des données fausses dues à la confusion : la confusion est l'une des sources de la fausseté des données saisies par Marie Courtois. Par exemple, elle se trompe du prénom de sa tante. Elle saisit « Isabelle » au lieu d'« Élisabeth ». Ces deux prénoms sont phonétiquement proches. La patiente confuse aussi l'année de naissance de Bernard Courtois. Elle saisit « 2001 » au lieu de « 1901 ». La patiente se trompe des générations. Elle saisit le lien de parenté « fille » au lieu de « petite-fille » entre elle-même et Sandra Duval. Par ailleurs, elle

saisit que Sandra Duval travaille une « baby-sitter ». Cependant, sa fille dit que la petite est gardée en crèche.

Des données fausses dues à une faute de frappe : la patiente saisit « 1993 » au lieu de « 1939 » pour l'année de naissance de Josette Courtois. De plus, elle saisit pour l'année de naissance de sa mère Françoise Faure « 19088 » au lieu de « 1908 ». Dans ces deux cas, nous pensons que la fausseté de ces données est due à une faute de frappe.

Des données incohérentes : plusieurs incohérences sont détectées. Par exemple, la patiente saisit deux données contradictoires concernant sa relation familiale avec Josette Courtois (« sœur » et « cousine »). La relation de cousinage est fausse. La fausseté de cette donnée est la source de l'incohérence détectée.

La fausseté des données anciennes par rapport à la fausseté des données récentes : nous remarquons que la fausseté touche plus les données récentes relativement aux données anciennes. Par exemple, la patiente ne se rappelle pas de toutes les dates de naissance de ses petits-fils et elle se rappelle partiellement, même si saisies de façon imprécise, des dates de naissance de son mari, ses deux filles et ses parents.

Des données incomplètes dues à un oubli partiel : nous remarquons l'existence des données partiellement incomplètes (marquées en violet). La patiente se souvient partiellement des dates de naissance. Par exemple, elle se rappelle uniquement de l'année de naissance de Sandra Duval et elle oublie le jour et le mois.

Des données incomplètes dues à un oubli total : nous constatons l'existence de données incomplètes dues à un oubli total. Par exemple, la patiente oublie de saisir son oncle Olivier Courtois et son frère Antoine Courtois.

Des données incomplètes non dues à un oubli, mais par non connaissance : la patiente ne saisit pas les dates de naissance de ses grands-parents, sa tante Isabelle Faure et son docteur Philippe Grau. Nous ne pouvons pas lier le fait qu'elle présente des troubles de la mémoire pour ne pas saisir ces données. Ce type de problème n'est pas typique au malade d'Alzheimer, car même les personnes jeunes et saines ne connaissent pas nécessairement ces données. Sa fille non plu ne connaît pas toutes les données demandées. Son champ de connaissances ne couvre pas toutes les données à saisir.

Des données temporelles imprécises : la plupart des données temporelles sont imprécises. En effet, la patiente saisit les dates de naissance et la date de son mariage d'une façon imprécise. Par exemple, elle saisit que son mari fête son anniversaire pendant les

vacances d'été. Nous pouvons donc deviner qu'il est né soit en juillet soit en août. Aussi, elle saisit qu'elle s'est mariée depuis la fin des années soixante. Par la suite, l'année de mariage cherchée est, avec une probabilité croissante, en 1965, ou 1966, ou 1967, ou 1968, ou 1969.

La circonlocution (la substitution d'un mot par sa description) : lors de la saisie du métier de Patrick Courtois, la patiente a une difficulté à trouver le mot représentant son métier. Elle substitue le mot voulu avec d'autres mots. Elle saisit « Il travaille dans le domaine des véhicules. Il les répare ». Nous devinons que le métier cherché est le mécanicien. Ce type d'imperfection est dû à l'oubli et il n'a pas d'impact sur la complétude des données.

Des données inutiles : Nous remarquons que certaines données sont inutiles. Par exemple, la patiente saisit deux fois que Patrick Courtois est son grand-père.

Des données liées à plusieurs types d'imperfection : nous remarquons que certaines données sont liées à plus qu'un seul type d'imperfection. Par exemple, la donnée « pendant les vacances d'été » saisie par la patiente pour indiquer le mois de naissance d'Alexandre Dubois est imprécise (qui signifie août ou juillet) et fausse.

4.4. Notre typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO

Dans cette section, nous introduisons notre propre typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO, comme le montre la Figure 22. Nous nous basons sur l'état de l'art établi et les constatations relatives aux saisies dans le prototype. Cette typologie peut être généralisable à d'autres applications pour les patients d'Alzheimer. La proposition d'une typologie de l'imperfection de ces données est une tâche difficile vu la nature entrelacée de ses différents types.

Nous distinguons les types d'imperfection directs et ceux indirects. Les types d'imperfection directs sont dégagés à partir des données saisies : l'incertitude, la confusion, l'erreur de saisie, la connaissance erronée, l'oubli, l'inconnaissance, l'imprécision, la circonlocution et l'inutilité. Des types d'imperfection indirects en sont impliqués. Par exemple, l'incertitude, la confusion, l'erreur et la connaissance erronée engendrent l'incohérence. Nous distinguons trois types d'imperfection indirects : l'incohérence, l'incomplétude et la redondance.

Cette typologie de l'imperfection des données saisies peut être généralisable à d'autres applications pour les malades d'Alzheimer.

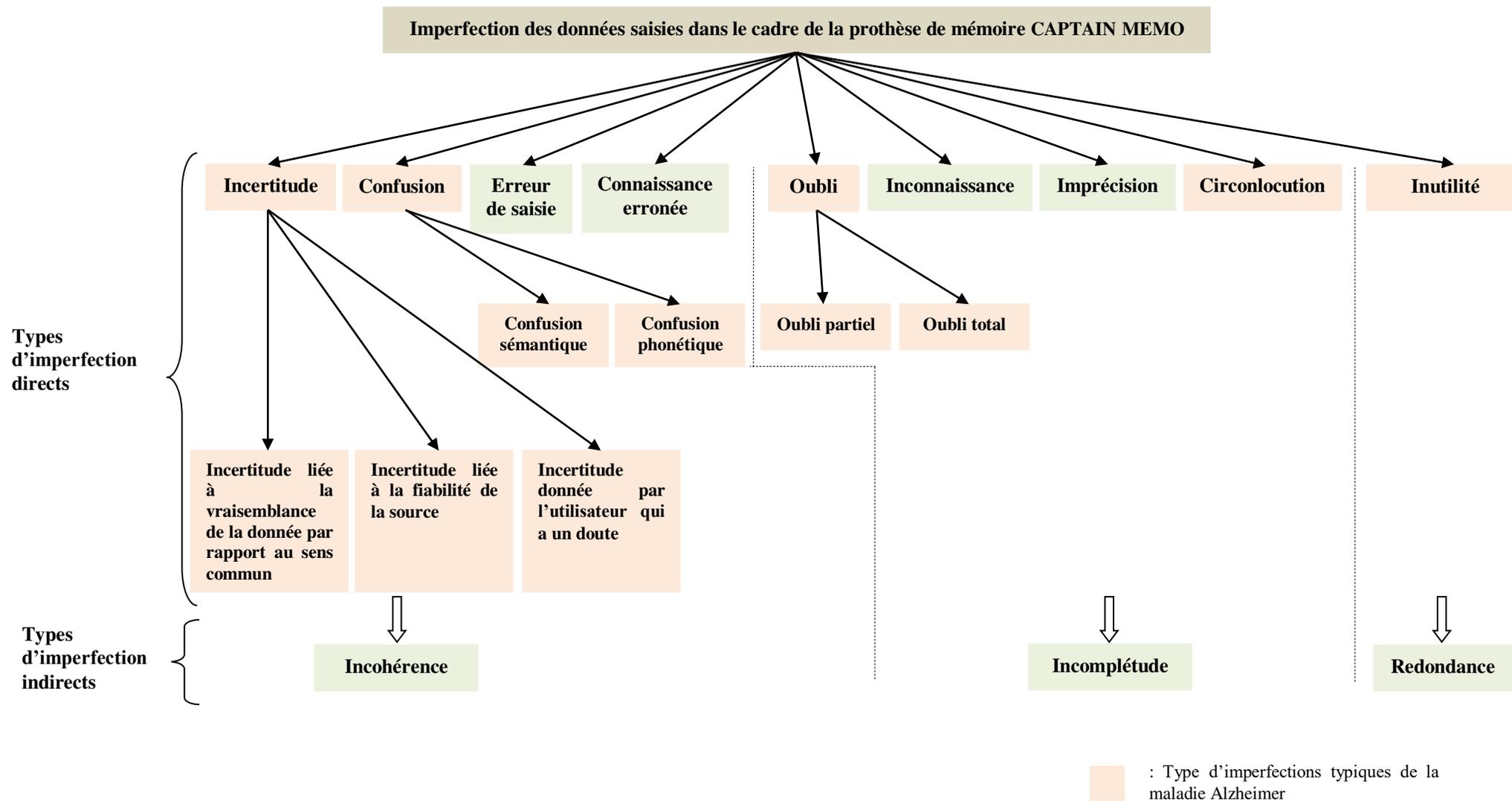


Figure 22. Notre typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.

4.4.1. Types d'imperfection directs

Nous distinguons neuf types d'imperfection directs des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO : l'incertitude, la confusion, l'erreur de saisie, la connaissance erronée, l'oubli, l'inconnaissance, l'imprécision, la circonlocution et l'inutilité. Ces derniers sont détaillés dans ce qui suit.

Incertain : les données saisies par le malade d'Alzheimer sont incertaines. Nous proposons deux classifications de l'incertitude.

La **première classification est relative à la vraisemblance des données par rapport au sens commun** (« **incertitude des données vraisemblables par rapport au sens commun** » et « **incertitude des données non-vraisemblables par rapport au sens commun** »). La première catégorie englobe les données incertaines qui respectent bien les règles du sens commun. Ces données peuvent être soit vraies soit fausses. Par exemple, si le patient saisit que son père est Olivier, un homme de 90 ans avec le même nom de famille que le patient ; c'est très vraisemblable, mais c'est quand même faux. La deuxième catégorie englobe les données incertaines non vraisemblables par rapport aux règles générales du sens commun. Par la suite, ces données sont fausses. Par exemple, le patient saisit « Mon père est Thérèse ». Cette affirmation est fausse, car Thérèse est une femme.

La **seconde classification est relative à la source de l'incertitude** (« **incertitude liée à la fiabilité de l'utilisateur** » et « **incertitude de celui qui entre la donnée** »). L'incertitude liée à la fiabilité de **l'utilisateur** englobe les données saisies par le malade d'Alzheimer dont il est sûr de leur véracité. Cependant, ces données sont incertaines, car la maladie d'Alzheimer affecte les facultés mentales du patient. Comme mentionné dans la section 4.3, Marie Courtois saisit des données fausses qu'elle a crues vraies. L'incertitude de celui qui entre la donnée englobe les données pour lesquelles le patient affirme qu'il n'est pas sûr de leur certitude. Par exemple, il saisit « Je ne suis pas sûre que la fille de ma voisine s'appelle Maya », ou « Je pense que ma nièce a seulement deux enfants », ou « Je pense que Pierre est un infirmier ».

En conclusion, toutes les données saisies par le malade d'Alzheimer dans le cadre de CAPTAIN MEMO sont incertaines.

La véracité des données dépend du facteur temps : en effet, une donnée peut être vraie pour une période de temps donnée et fausse pour une autre période de temps. En effet, les relations interpersonnelles varient au cours du temps. Prenons l'exemple de cette donnée

fournie par le malade d'Alzheimer « Pierre est mon voisin ». Cette donnée est fautive si Pierre déménage à une autre maison. Plusieurs autres exemples peuvent être cités : « Je vais visiter ma sœur au cours de cette semaine » et « Nous fêtons l'anniversaire de Lucine ce lundi ».

Confusion : les données saisies par un malade d'Alzheimer peuvent être sujettes à une confusion. Nous distinguons **la confusion sémantique** et **la confusion phonétique**. La confusion sémantique est relative à la substitution d'un mot par un autre sémantiquement proche du terme voulu. Par exemple, le malade d'Alzheimer dit « la poire » au lieu de « la pomme ». La confusion phonétique - survenant à un stade plus avancé - est relative à la substitution d'un mot par un autre phonétiquement proche du terme voulu. Par exemple, le malade d'Alzheimer dit « fourchette » au lieu de « poussette ».

Erreur de saisie : les données saisies par un malade d'Alzheimer ou un utilisateur de son entourage peuvent être sujettes à une erreur. Par exemple, comme mentionné dans la section 4.3, Marie Courtois saisit deux données fautes à cause d'une faute de frappe.

Connaissance erronée : en toute bonne foi, un utilisateur peut se tromper et croire une donnée juste alors qu'elle est fautive. Ce type d'imperfection n'est pas lié à la maladie d'Alzheimer. En effet, tout le monde peut se tromper.

Oubli : les données saisies par un malade d'Alzheimer peuvent être sujettes à l'oubli. En effet, les troubles mnésiques représentent la pierre angulaire des symptômes de la maladie d'Alzheimer. Nous distinguons **l'oubli total** et **l'oubli partiel**. L'oubli total englobe les données dont le patient les oublie totalement. L'oubli engendre l'incomplétude des données.

Inconnaissance : le champ de connaissances du malade d'Alzheimer et/ou son entourage ne couvre évidemment pas l'ensemble de son entourage et de ses activités passées et à venir. Par exemple, le frère du patient ne connaît pas nécessairement toutes les données relatives aux collègues du travail de son frère.

Imprécision : les données saisies par le malade d'Alzheimer et/ou son entourage peuvent être imprécises. Cependant, ce type d'imperfection s'accroît avec une personne atteinte de la maladie d'Alzheimer. En effet, elle utilise davantage les mots génériques. L'utilisation de plus en plus fréquente de mots génériques entraîne un discours vague [Barkat-Defradas, 2008]. Par exemple, le malade d'Alzheimer saisit « J'ai déménagé à Nantes quand j'étais jeune ». Nous pouvons dire qu'un homme est jeune s'il a 20 ans. Alors est-il jeune s'il n'a que 21 ans ou 22 ans ? Selon l'usage normal, la réponse sera oui. Ainsi, le vieillissement d'une année de la personne ne semble pas changer un homme jeune en homme vieux.

Cependant, est-il pensable de dire qu'un homme de 100 ans est jeune ? Évidemment non. En revanche, pouvons-nous définir une limite différenciant les âges pour lesquels nous sommes jeunes ? Sommes-nous jeune à partir de 20 ans, 25 ans, 30 ans, 35 ans ou 40 ans ? Aucune limite précise et admise par tous ne peut être émise. Le deuxième exemple concerne l'imprécision des données temporelles. En effet, l'utilisateur trouve une difficulté à se rappeler d'une façon précise des dates. Par exemple, le malade d'Alzheimer saisit « Ma petite fille Maya est née vers 1988 ». D'autres exemples peuvent être cités : « Je suis mariée depuis à peu près trente ans », « J'ai voyagé à Paris vers les années soixante-dix », etc.

Circonlocution : les données saisies par un malade d'Alzheimer peuvent être l'objet d'une circonlocution. Le malade d'Alzheimer souffre d'un déclin de sa capacité dénominate. Il va dire « La personne âgée qui habite au 3^{ème} » au lieu de « madame Ledoux ». La circonlocution n'entraîne pas de problèmes de compréhension. Par exemple, le malade saisit « Maya est la fille de mon fils » en référence à « Maya est ma petite-fille ».

Inutilité : les données saisies par un malade d'Alzheimer peuvent être inutiles car non gérées par le logiciel. Souvent les données entrées sont inutiles, car elles peuvent être déduites de celles précédemment entrées.

Remarque : une donnée peut être liée à plusieurs types d'imperfection. Par exemple, le malade d'Alzheimer annonce que « le nom de mon aide-soignante commence par un 'S', peut-être Sophie ou Sylvie ». Cette affirmation présente quatre types d'imperfection : l'incertitude, l'oubli (partiel), la confusion et l'imprécision.

Les types d'imperfection directs des données saisies engendrent d'autres types d'imperfection indirects présentés dans la section suivante.

4.4.2. Types d'imperfection indirects

Nous distinguons trois types d'imperfection indirects des données saisies : l'incohérence, l'incomplétude et la redondance. Ces imperfections sont automatiquement engendrées par les types d'imperfection directs.

Incohérence : pour définir l'incohérence, nous avons recours à la définition citée dans [Gavignet, 2017]. L'incohérence fait référence à « l'existence de données contradictoires sur un même objet ». La présence d'erreurs, de données erronées, incertaines ou la confusion sont les sources des incohérences.

Incomplétude : l'incomplétude est relative à l'absence des données et aux données lacunaires. L'oubli, l'inconnaissance, l'imprécision et la circonlocution engendrent l'incomplétude des données.

Redondance : la redondance est normale dans le discours, mais pas dans une base de connaissances en raison des incohérences qu'elle pourrait entraîner en cas de mises à jour, et de la difficulté induite pour la visualisation des données. L'inutilité engendre la redondance des données.

4.5. Notre méthodologie générale de l'estimation et l'amélioration de la qualité des données

Dans cette section, nous présentons notre méthodologie qui vise à estimer et à améliorer la qualité des données. Nous pensons qu'il ne faut pas estimer la qualité d'une donnée sujette à différentes formes d'imperfection en se basant sur un seul score de qualité (par exemple, nous pensons que nous ne pouvons pas prendre en compte l'incomplétude et l'incertitude des données en nous basant sur le même score de qualité).

Par rapport aux travaux connexes, notre méthodologie qualité propose que pour chaque type d'imperfection ou un ensemble de types d'imperfection, il faut estimer un score de qualité. En se basant sur ce dernier, une ou plusieurs actions correctives doivent être proposées.

Notre méthodologie est composée de plusieurs étapes. Premièrement, il faut classifier les différents types d'imperfection des données {type d'imperfection 1, type d'imperfection 2,..., type d'imperfection N}. Dans le cadre de CAPTAIN MEMO, la typologie de l'imperfection des données saisies est présentée dans la section précédente. Deuxièmement, pour chaque type d'imperfection « type d'imperfection n » ($n \in [1..N]$), il faut identifier une ou plusieurs dimensions de la qualité {dimension de la qualité n/1, dimension de la qualité n/2,..., dimension de la qualité n/M}. Troisièmement, pour chaque dimension de la qualité « dimension de la qualité n/m » ($m \in [1..M]$) identifiée à l'étape précédente, il faut identifier ses sous-dimensions de la qualité permettant de l'évaluer qualitativement {sous-dimension de la qualité n/m/1, sous-dimension de la qualité n/m/2, ..., sous-dimension de la qualité n/m/K}. Quatrièmement, pour chaque sous-dimension de la qualité « sous-dimension de la qualité n/m/k » ($k \in [1..K]$) identifiée à l'étape précédente, il faut définir une ou plusieurs métriques

de la qualité permettant de l'estimer quantitativement : {métrique de la qualité n/m/k/1, métrique de la qualité n/m/k/2,..., métrique de la qualité n/m/k/L}. Cinquièmement, pour chaque type d'imperfection n, il faut se baser sur l'ensemble des métriques de la qualité associées identifiées « métrique de la qualité n/m/k/l » ($l \in [1..L]$) pour générer un score unique représentant la qualité de la donnée par rapport au type d'imperfection n. En se basant sur ce dernier, il faut définir un ensemble d'actions correctives. L'algorithme général de cette méthodologie est le suivant :

-
1. Identifier les N *différents types d'imperfection des données* : *type d'imperfection 1, type d'imperfection 2, ..., type d'imperfection N* ;
 2. **Pour chaque type d'imperfection des données n** ($n \in [1..N]$) **faire**
 - 2.1. Identifier les M dimensions de la qualité associées : *dimension qualité n/1, dimension qualité n/2, ..., dimension qualité n/M* ;
 - 2.2. **Pour** chaque dimension de la qualité n/m ($m \in [1..M]$) **faire**
Identifier les K sous-dimensions permettant d'estimer qualitativement la dimension de la qualité n/m : *sous-dimension de la qualité n/m/1, sous-dimension de la qualité n/m/2, ... sous-dimension de la qualité n/m/K* ;
 - 2.3. **Pour** chaque sous-dimension de la qualité n/m/k ($k \in [1..K]$) **faire**
Identifier les L métriques de la qualité permettant d'estimer quantitativement la sous-dimension de la qualité n/m/k: *métrique de la qualité n/m/k/1, métrique de la qualité n/m/k/2, ..., métrique qualité n/m/k/L* ;
 - 2.4. Mesurer la qualité des données en utilisant les métriques définies ;
 - 2.5. *Analyser et envisager l'(les) action(s) correctives.*
-

Algorithme 2. Notre méthodologie générale de l'estimation et l'amélioration de la qualité des données.

Cette méthodologie est proposée principalement dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Cependant, elle peut être applicable dans d'autres domaines et d'autres applications.

4.6. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous mettons l'accent sur l'imperfection et la qualité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Dans un premier temps, nous établissons et analysons un échantillon fictif de données saisies par une malade d'Alzheimer et sa fille. Cet échantillon a pour but d'illustrer les différentes formes d'imperfection, principalement dues à la discordance mnésique provoquée par la maladie d'Alzheimer.

Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature une typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer. C'est pour cette raison, nous proposons une typologie des données saisies par le malade d'Alzheimer ou un utilisateur de son entourage. Elle propose neuf types d'imperfection directs (l'incertitude, la confusion, l'erreur de saisie, la connaissance erronée, l'oubli, l'inconnaissance, l'imprécision, la circonlocution et l'inutilité) et trois types d'imperfection indirects (l'incohérence, l'incomplétude et la redondance). Cette typologie peut être généralisable à d'autres applications pour les malades d'Alzheimer.

L'imperfection des données affecte leurs qualités. Nous proposons finalement une méthodologie générale pour l'estimation et l'amélioration de la qualité des données. Par rapport aux travaux connexes, cette dernière propose qu'il ne faut pas traiter tous les types d'imperfections attachées à une donnée en se basant sur le même score de qualité.

Dans le chapitre suivant (chapitre 5), nous nous intéressons à la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Nous proposerons un ensemble de dimensions et de métriques pour estimer qualitativement et quantitativement la crédibilité de chaque donnée saisie.

Dans le chapitre 6, nous aborderons le problème de la représentation de l'imprécision des données temporelles saisies et du raisonnement que l'on peut faire dessus. Deux solutions basées sur les intervalles temporels imprécis seront proposées.

CHAPITRE 5 :

**Prise en compte de la discordance
mnésique : estimation de la crédibilité
des données saisies dans CAPTAIN
MEMO**

5.1. Introduction

Comme mentionné dans le chapitre précédent, les données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO sont imparfaites. Dans ce chapitre, nous nous intéressons au fait que l'utilisateur de CAPTAIN MEMO **peut saisir des données fausses**. La fausseté des données est due aux quatre types d'imperfection suivants : l'incertitude, la confusion, l'erreur de saisie et la connaissance erronée. En conséquence, **la crédibilité de chaque donnée saisie fera l'objet d'une estimation**.

L'état de l'art montre que les dimensions et les métriques permettant l'estimation de la crédibilité des données dépendent du domaine. À notre connaissance, **il n'existe pas dans la littérature des travaux pour estimer qualitativement et quantitativement la crédibilité des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer**.

Dans un premier temps, nous proposons un **modèle d'évaluation de la crédibilité** des données saisies par le patient d'Alzheimer ou son entourage (première contribution). Ce modèle propose un ensemble de dimensions permettant **d'évaluer qualitativement la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO**. Dans un deuxième temps, nous nous basons sur ce dernier pour proposer une **approche, nommée Data Believability Estimation for Applications to Alzheimer Patients (DBE_ALZ), permettant d'estimer quantitativement la crédibilité de ces données** (seconde contribution). Cette approche est basée sur le raisonnement incertain en utilisant les réseaux bayésiens et le raisonnement approximatif en utilisant les systèmes d'inférence floue. La Figure 23 résume notre travail.

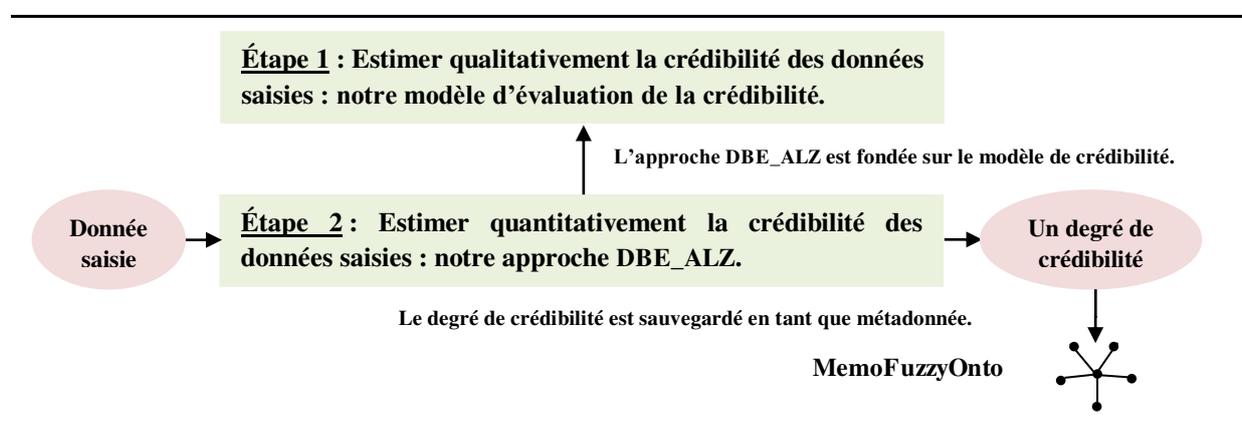


Figure 23. Estimation qualitative et quantitative de la crédibilité des données saisies dans CAPTAIN MEMO.

La suite du présent chapitre est structurée comme suit. Dans la section 5.2, nous élaborons un état de l'art qui aborde la crédibilité des données, la théorie des ensembles flous et les réseaux bayésiens. Dans la section 5.3, nous introduisons notre modèle d'évaluation de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO. La section 5.4 présente notre approche DBE_ALZ pour estimer quantitativement la crédibilité de ces données. Enfin, dans la dernière section, nous terminons par une conclusion et quelques perspectives.

5.2. État de l'art

Cet état de l'art comporte trois volets : (1) la crédibilité des données, (2) la théorie des ensembles flous et (3) les réseaux bayésiens.

5.2.1. Crédibilité des données

Nous collectons à partir de la littérature quelques définitions de la crédibilité des données. Puis, nous passons en revue quelques travaux définissant des dimensions et des métriques pour évaluer cette dernière.

5.2.1.1. Définition

Il n'existe pas une définition claire et unique de la crédibilité des données [Togelius et al., 2013]. Elle est typiquement **interdisciplinaire et sa définition varie selon la discipline** [Macedo-Rouet et al., 2008]. Elle est la dimension la plus importante de la qualité des données [Wang et Strong, 1996] [Prat et Madnick, 2007] [Watts et al., 2009] [Moosavizadeh et al., 2012].

La définition la plus citée de la crédibilité des données est celle de Wang et Strong. Ils la définissent comme “the extent to which data are accepted or regarded as true, real and credible” [Wang et Strong, 1996]. [Pipino et al., 2002] et [Hong, 2006] adoptent la même définition que celle de Wang et Strong. Naumann la définit comme “expected accuracy” [Naumann, 2002]. Nous considérons que la définition la plus complète est celle de [Moosavizadeh et al., 2012]: “the extent in which the data is accepted, in a specific environment and in accordance with relevant rules; as true, or as item which seems to be true, real and credible”.

5.2.1.2. Évaluation

L'évaluation de la crédibilité des données se base sur la définition d'un ensemble de dimensions et de métriques. L'identification des dimensions permet de l'évaluer qualitativement. Pour chaque dimension, une ou plusieurs métriques sont associées afin de l'évaluer quantitativement. Très peu de travaux abordent la problématique de l'évaluation de la crédibilité des données.

Historiquement, [Lee et al., 2006] est le premier travail qui tente d'identifier les dimensions de la crédibilité des données. Les auteurs proposent trois dimensions :

- **“Believability of source”**: cette dimension est définie comme “data originates from a trustworthy source”;
- **“Believability compared to internal common-sense standard”**: cette dimension est liée à la cohérence d'une donnée par rapport à ses différentes sources (les différentes sources s'accordent sur la valeur de la donnée) et sa cohérence par rapport aux temps (la valeur de la donnée est cohérente avec ses valeurs antérieures) ;
- **“Believability based on temporality of data”**: cette dimension est définie comme “the extent to which a data value is credible based on proximity of transaction time to valid times and derived from data values with overlapping valid times”.

Les auteurs n'ont pas proposé de métriques qui permettent de mesurer quantitativement cette notion.

Les auteurs de [Prat et Madnick, 2008] proposent une approche pour estimer quantitativement la crédibilité des données en se basant sur les “provenance metadata”. Ce travail est basé sur les dimensions de la crédibilité proposées dans [Lee et al., 2006]. Il se résume en trois étapes. La première étape consiste à définir un ensemble de métriques permettant l'évaluation de la crédibilité de la source de la donnée. La seconde étape consiste à définir un ensemble de métriques permettant l'évaluation de la “believability of data resulting from one process run”. La troisième étape consiste à évaluer la crédibilité de la donnée en se fondant sur les métriques définies dans les deux premières étapes.

La définition des dimensions et des métriques pour estimer la crédibilité des données **dépend du domaine**. À l'heure actuelle, à notre connaissance, **il n'existe pas de travaux qui définissent des dimensions et des métriques pour évaluer la crédibilité des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer**. Nous attirons

l'attention que la plupart des travaux connexes à notre prothèse de mémoire comptent seulement sur l'entourage du malade d'Alzheimer pour la saisie des données. C'est pour cela que nous nous inspirons des travaux présentés dans cet état de l'art pour proposer notre propre **modèle de crédibilité et notre approche DBE_ALZ permettant respectivement d'évaluer qualitativement et quantitativement la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO**. Notre approche DBE_ALZ repose sur la théorie des ensembles flous et la théorie des probabilités qui sont présentées dans les deux sections qui suivent.

5.2.2. Théorie des ensembles flous

Notre étude de la théorie des ensembles flous se fonde sur deux volets : (1) le principe et les concepts de base de cette théorie et (2) les systèmes d'inférence floue.

5.2.2.1. Principe et concepts de base

La logique floue (logique linguistique) est introduite par Lotfi Zadeh comme **une extension de la logique booléenne** [Zadeh, 1965]. Elle s'appuie sur la théorie mathématique des ensembles flous (parties floues), qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. Ces ensembles permettent **de modéliser l'imprécision** qui caractérise souvent les représentations humaines des connaissances. Prenons l'exemple de [Sanchez et al., 2006], en logique classique, à la question « Est-ce que cette personne est grande ? », nous ne pouvons répondre que par « vrai », si c'est le cas, ou « faux », dans le cas contraire. En logique floue, nous pouvons représenter les cas où la personne est très petite, moyennement petite, normale, pas très grande, grande, etc. La logique floue permet la caractérisation des éléments de façon **« graduelle »**. En introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition, permettant ainsi à une condition d'être dans un autre état que « vrai » ou « faux ». Aujourd'hui, la logique floue est arrivée à maturité et elle est utilisée dans différents domaines d'application [Maalej et al., 2010].

5.2.2.2. Ensemble flou

Un ensemble flou est considéré comme une généralisation d'un ensemble classique qui permet de modéliser l'imprécision. Il peut contenir des éléments définis de façon partielle. **Il est défini par une « fonction d'appartenance » et une « variable linguistique »**. Comme dans le cas des ensembles classiques, les opérations d'union, d'intersection et de complémentation peuvent être définies sur les ensembles flous.

5.2.2.3. Fonction d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notion de la fonction caractéristique en logique classique. Elle permet de **déterminer le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou donné.**

Définition (Fonction d'appartenance) : soit un univers X , nous définissons un ensemble flou A dans X par l'application de μ_A (μ_A est la fonction d'appartenance de l'ensemble flou A) de X dans l'intervalle $[0, 1]$. À tout élément $x \in X$, nous associons la valeur $\mu_A(x)$ tel que

$$0 \leq \mu_A \leq 1 \quad (\mu_A: X \rightarrow [0, 1])$$

- $\mu_A(x) = 1$, c'est-à-dire x appartient à A et il satisfait pleinement la propriété A ;
- $\mu_A(x) = 0$, c'est-à-dire x n'appartient pas à A ;
- $\mu_A(x) \neq 0, 1$ alors $\mu_A(x)$ est une valeur intermédiaire entre 0 et 1. Nous disons que x appartient à A avec un degré $\mu_A(x)$.

Supposons que nous définissions un ensemble de personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous convenons, à titre d'exemple, qu'une personne de taille moyenne est celle dont la taille est comprise entre 1,60 m et 1,80 m. La fonction caractéristique associée retourne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle $[1,60 \text{ m} ; 1,80 \text{ m}]$ et « 1 » dans cet intervalle, comme le montre la Figure 24.

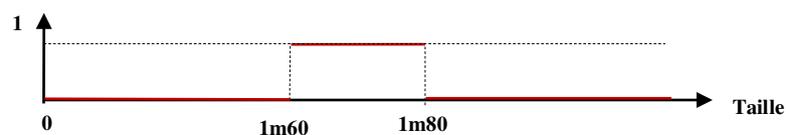


Figure 24. Fonction caractéristique de l'ensemble des personnes de « taille moyenne ».

L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » est défini par une fonction d'appartenance. À chaque taille possible, un degré d'appartenance compris entre 0 et 1 est associé, comme le montre la Figure 25.

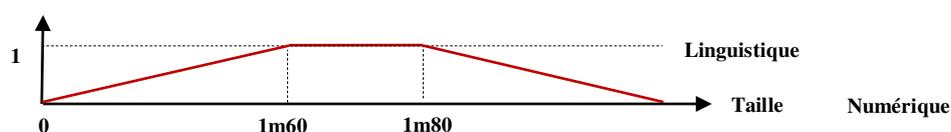


Figure 25. Fonction d'appartenance de l'ensemble flou des personnes de « taille moyenne ».

La fonction d'appartenance peut théoriquement prendre n'importe quelle forme. Toutefois, un certain nombre de fonctions d'appartenance, proposées par [Zadeh, 1975], sont communément utilisées : **la fonction triangulaire, la fonction monotone croissante, la fonction monotone décroissante et la fonction trapézoïdale** (Figure 26).

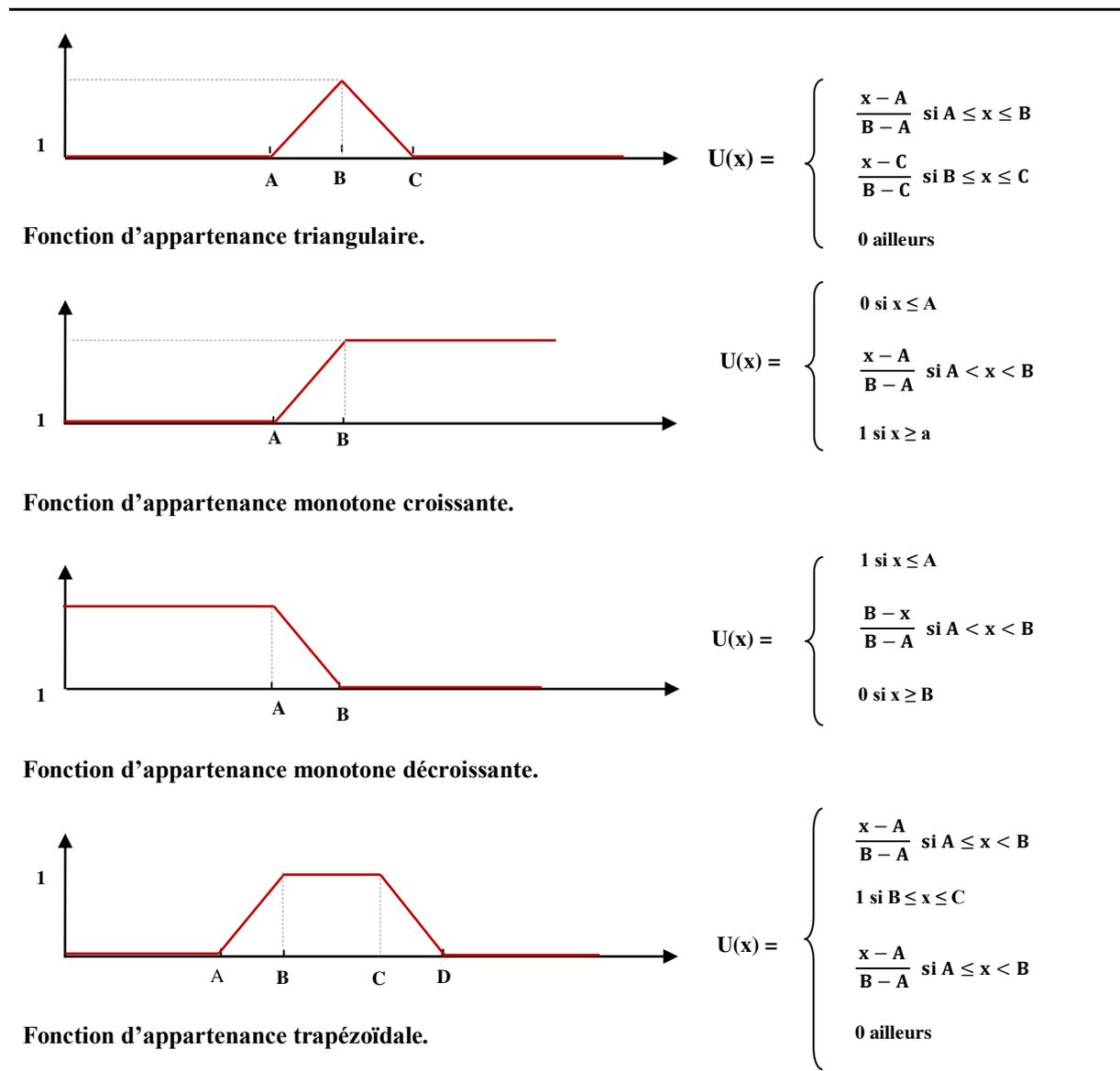


Figure 26. Fonctions d'appartenance proposées par [Zadeh, 1975].

5.2.2.4. Variable linguistique

Une variable linguistique est **une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases exprimés dans un langage artificiel ou naturel**. Prenons l'exemple mentionné dans [Akermi et al., 2016], les auteurs définissent une variable linguistique appelée « Taille ». Les valeurs de cette dernière sont « petites », « moyennes » et « longues ».

Définition (Variable linguistique) : soit un univers X , une variable linguistique est définie par le triplé (V, X, T_V) . V est son nom. V est défini sur un ensemble appelé univers de discours numérique. L'univers de discours est l'ensemble des valeurs réelles que peut prendre la variable floue. L'ensemble $T_V = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ fini ou infini, contient des ensembles flous normalisés de X , utilisables pour caractériser V . Toutes les descriptions imprécises de la variable V sont décrites par la liste T_V . A_1, A_2, \dots, A_n sont appelés termes linguistiques ou étiquettes linguistiques.

5.2.2.5. Opérateurs flous

Les opérateurs sur les ensembles flous permettent d'écrire des combinaisons logiques entre les différentes notions floues, c'est-à-dire de **faire des calculs sur des degrés de vérité**. Ces opérations sont des extensions des opérations proposées sur les ensembles classiques. Les opérateurs flous les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh ». Ils sont décrits ci-dessous.

Tableau 9. Opérateurs flous « de Zadeh ».

Opérateur flou	Définition	Exemple
Intersection (ET)	Le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B : $\mu_A(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu_A(A), \mu_A(B))$	« Température basse » est vraie à 0,7. « Pression faible » est vraie à 0,5. « Température basse ET Pression faible » est donc vraie à 0,5 = MIN (0,7; 0,5).
Union (OU)	Le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B : $\mu_A(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(\mu_A(A), \mu_A(B))$	« Température basse » est vraie à 0,7 « Pression faible » est vraie à 0,5 « Température basse OU Pression faible » est donc vraie à 0,7 = MAX (0,7, 0,5).
Complément (NON)	L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation. $\mu_A(\text{NON } A) = 1 - \mu_A(A)$	« Température basse » est vraie à 0,7 « NON Température basse », que l'on utilisera généralement sous la forme « Température NON basse », est donc vraie à 0,3.

5.2.2.6. Systèmes d'inférence floue : le raisonnement flou

Les systèmes d'inférence floue sont une des applications les plus courantes de la logique floue [Guillaume et Charnomordic, 2013]. Ils implémentent des concepts sous la forme de variables linguistiques, ainsi qu'un raisonnement déductif, à l'aide de règles floues. Ils peuvent avoir une ou plusieurs sorties. Chaque sortie est un ensemble de valeurs possibles

dont l'interprétation varie avec le type de règles. Ils comprennent les étapes suivantes : **la fuzzification, l'implication et la défuzzification**, comme le montre la Figure 27.

Fuzzification : elle permet de **passer du domaine réel au domaine flou**. Pour fuzzifier, les experts du domaine doivent fournir, pour chaque variable d'entrée et de sortie, son univers du discours, une partition en classe floue de cet univers et les fonctions d'appartenance de chacune de ces classes. **La fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles floues : c'est la détermination du degré de confiance de chacune des conditions des règles pour la valeur de l'entrée (instance).**

Implication : l'étape d'implication ou d'inférence permet d'illustrer un raisonnement humain exprimé sous forme de règles floues. Une règle floue a cette forme : SI « prédicat » ALORS « conclusion ». Un prédicat (prémisse ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs flous (ET, OU et NON). Le caractère flou de la règle provient du fait que le prédicat, et éventuellement la conclusion sont définis par des concepts linguistiques, implémentés par des ensembles flous (par exemple : SI « Pression forte » ET « Température élevée » ALORS « Ouverture vanne grande »). Le résultat de l'application d'une règle floue dépend de trois facteurs : (1) la définition d'implication floue choisie, (2) la définition de la fonction d'appartenance de l'ensemble flou de la proposition située en conclusion de la règle floue et (3) le degré de validité des propositions situées en prémisse.

Une base de règles floues est composée de règles floues définies par le savoir-faire de l'expert. L'ensemble de ces règles est appelé une matrice de décisions. Les systèmes d'inférence floue sont des systèmes multi-règles. Plusieurs règles peuvent être activées simultanément. Une règle est activée dès qu'elle a une prémisse ayant une valeur de vérité non nulle. Chaque règle délivre une conclusion partielle qui est ensuite agrégée aux autres règles pour fournir une conclusion générale (agrégation). L'agrégation est le processus d'unification des résultats de toutes les règles.

Il existe deux mécanismes d'inférence : le modèle flou de Mamdani [Mamdani et Assilian, 1975] **et le modèle flou de Takagi-Sugeno** [Takagi et Sugeno, 1985]. Ils diffèrent au niveau de la conclusion. Pour le mécanisme d'inférence de Mamdani, les prémisses et la conclusion sont des propositions floues qui utilisent des variables linguistiques. Pour le mécanisme d'inférence de Takagi-Sugeno, les conclusions des règles utilisent des variables numériques plutôt que des variables linguistiques.

Défuzzification : elle permet de **passer du domaine flou au domaine réel**. C'est l'**inverse de la fuzzification**. C'est une phase importante, car le système d'inférence floue doit communiquer des valeurs précises à l'utilisateur final. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification tels que la méthode du maximum, la méthode moyenne des maximums et la méthode du centre de gravité. **La méthode du maximum** consiste à ne considérer, pour chaque sortie, que la règle présentant le maximum de validité. Cette règle ignore les règles secondaires qui peuvent néanmoins être importantes pour le fonctionnement et la stabilité du système. **La méthode moyenne des maximums** considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale. **La méthode du centre de gravité** consiste à tracer, sur un même diagramme représentant les ensembles flous de sortie, les différentes zones correspondant à chacune des règles et à calculer le centre de gravité de la zone consolidée. C'est la méthode la plus utilisée.

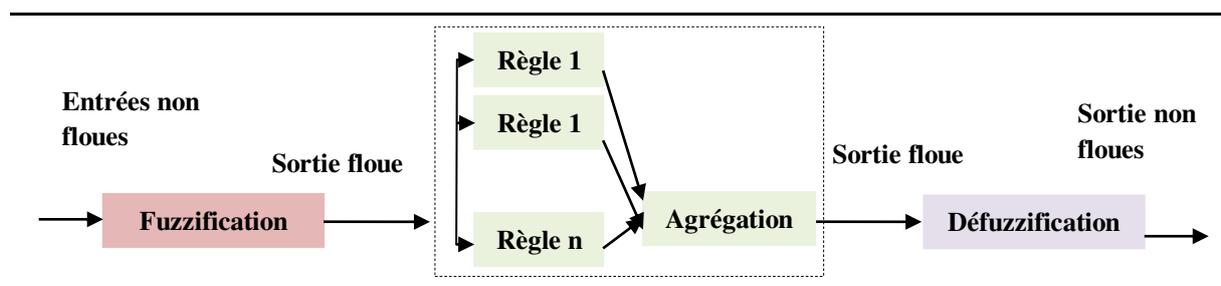


Figure 27. Système d'inférence floue.

Exemple d'un système d'inférence floue de Mamdani : le but est de déterminer la grandeur « ouverture vanne » à partir des deux grandeurs « pression » et « température ». Considérons un exemple avec la pression est égale à 2,5 bars et température est égale à 17°C. Tout d'abord, nous définissons deux variables linguistiques d'entrée (« Pression » et « Température ») et une variable linguistique de sortie (« Ouverture vanne »). La Figure 28 présente les fonctions d'appartenance des trois variables linguistiques.

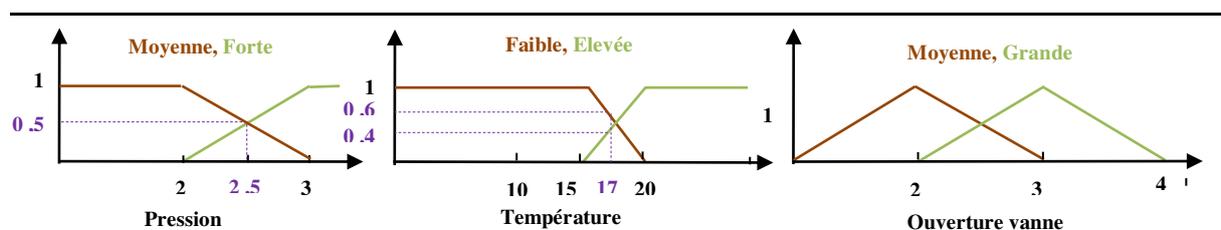


Figure 28. Fonctions d'appartenance des variables Pression, Température et Ouverture vanne.

La base des règles est formée par les quatre règles suivantes :

- Première règle (R₁) : SI « Pression forte » ET « Température élevée » ALORS « Ouverture vanne grande » ;
- Deuxième règle (R₂) : SI « Pression forte » ET « Température faible » ALORS « Ouverture vanne moyenne » ;
- Troisième règle (R₃) : SI « Pression moyenne » ET « Température élevée » ALORS « Ouverture vanne grande » ;
- Quatrième règle (R₄) : SI « Pression moyenne » ET « Température faible » ALORS « Ouverture vanne moyenne ».

Toutes ces règles sont activées. La Figure 29 représente l'inférence floue relative à l'activation de ces règles.

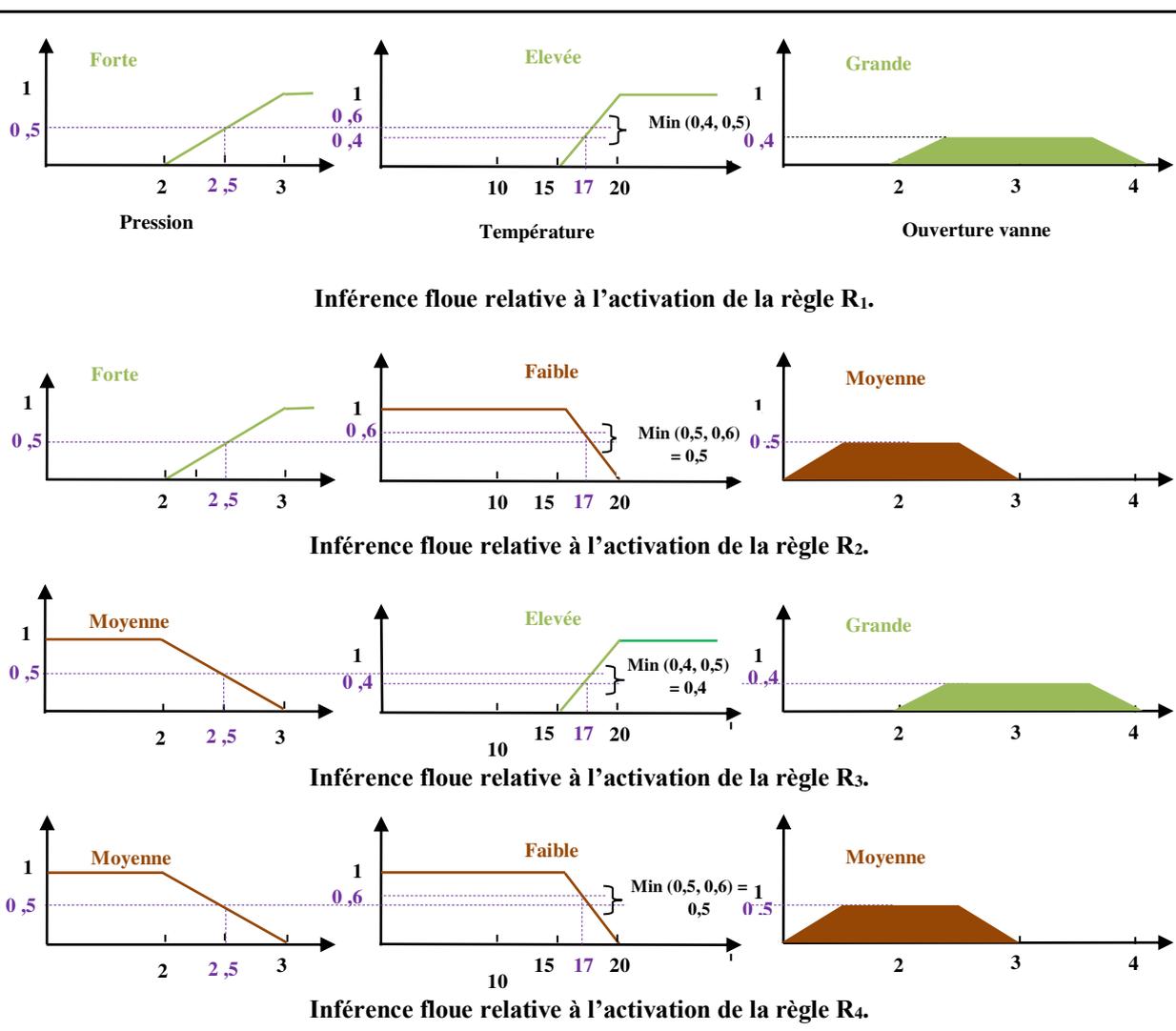


Figure 29. Activation des règles floues.

La Figure 30 présente l'agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles $\{R_1, R_2, R_3 \text{ et } R_4\}$.

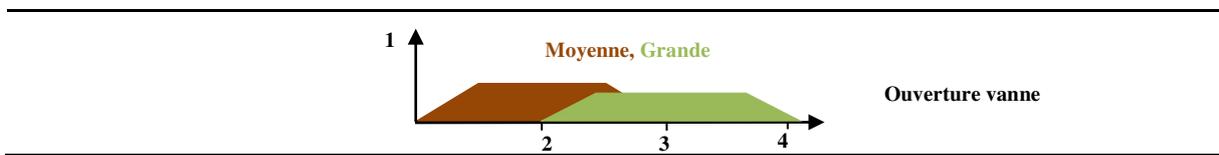


Figure 30. Agrégation MAXIMUM.

La défuzzification de l'ensemble flou « Ouverture vanne » par la méthode de défuzzification centre de gravité est égale à $35,6^\circ$.

5.2.3. Réseaux bayésiens : le raisonnement dans l'incertain

Une des caractéristiques de l'intelligence humaine est la capacité de **raisonner à partir d'une connaissance incertaine**. Pour stimuler ce genre de raisonnement dans les systèmes intelligents, nous avons recours aux théories relatives au « raisonnement incertain ». L'une de ces théories est **la théorie des probabilités** sur laquelle reposent **les réseaux bayésiens** [Pearl, 1988]. En effet, la théorie des probabilités permet de modéliser l'incertitude en se basant sur un ensemble de variables aléatoires. La combinaison du conditionnement en probabilité ainsi que d'une représentation sous forme de graphe de l'ensemble de ces variables aléatoires donnent naissance au concept de modèle graphique probabiliste, et en particulier au réseau bayésien lorsque le graphe est orienté.

5.2.3.1. Prérequis

Notions de probabilité

Nous présentons quelques notions de probabilité servant au traitement de l'incertain. Le triplet (Ω, Z, P) est appelé espace probabiliste. Il est formé de l'univers Ω , d'une tribu Z sur Ω et d'une mesure de probabilité P sur Z dans $[0,1]$. Les éléments de Z sont des événements. Le nombre $P(X_1)$ est appelé la probabilité de l'événement $X_1 \in Z$.

Si deux événements X_1 et X_2 sont incompatibles ou mutuellement exclusifs, alors $P(X_1 \cup X_2) = P(X_1) + P(X_2)$ et $P(X_1 \cap X_2) = 0$. Par contre, si X_1 et X_2 sont deux événements quelconques, alors $P(X_1 \cup X_2) = P(X_1) + P(X_2) - P(X_1 \cap X_2)$.

Deux événements X_1 et X_2 sont indépendants si et seulement si $P(X_1 \cap X_2) = P(X_1).P(X_2)$.

Si X_1 et X_2 sont deux événements quelconques avec $P(X_2) > 0$, la probabilité de X_1 conditionnellement à X_2 est notée $P(X_1|X_2)$ et vaut :

$$P(X_1|X_2) = \frac{P(X_1 \cap X_2)}{P(X_2)}$$

Théorème de Bayes

Le calcul dans un réseau bayésien se base sur le théorème de Bayes qui est introduit par Thomas Bayes en 1763 [Bayes, 1763].

Définition (Théorème de Bayes) : Soit les deux variables aléatoires X_1 et X_2 , la probabilité conditionnelle de X_2 sachant X_1 est déterminée par cette formule :

$$P(X_2|X_1) = \frac{P(X_1|X_2) \cdot P(X_2)}{P(X_1)}$$

5.2.3.2. Définition d'un réseau bayésien

Le réseau bayésien, introduit par Judea Pearl vers les années 80, est un modèle graphique probabiliste. Il combine une représentation de la connaissance sous forme probabiliste (une incertitude sur la connaissance) et graphique (des relations de dépendance directe). Il permet d'exprimer une distribution de probabilité sur un ensemble de variables aléatoires à l'aide d'un produit de distributions locales de probabilités. Il est formé par deux composantes :

- Une première composante graphique consiste en un graphe orienté sans circuit. Ce graphe est formé par des nœuds représentant les variables pertinentes du domaine et des arcs représentant les relations de dépendance entre ces variables ;
- Une seconde composante numérique consiste en un ensemble de distributions de probabilités conditionnelles de chaque nœud dans le contexte de ses parents.

Définition (Réseau bayésien) : Un réseau bayésien $B = (G, P)$ est défini par :

- Un graphe dirigé sans circuit $G = (X, E)$ où X représente les nœuds et E représente les arcs ;
- Un espace probabiliste (Ω, P) ;
- Un ensemble de variables aléatoires $X = \{X_1, \dots, X_n\}$ associées aux nœuds du graphe et définies sur (Ω, P) telles que

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i))$$

Avec $Pa(X_i)$ est l'ensemble des parents du nœud X_i dans G .

Les réseaux bayésiens causaux sont ceux dans lesquels l'arc est orienté de la cause vers la conséquence. La Figure 31 représente un graphe bayésien causal. L'information du nœud « Cause » peut modifier les croyances que nous avons sur le nœud « Conséquence ». Dans un graphe causal, le sens de la flèche indique le sens de la causalité.

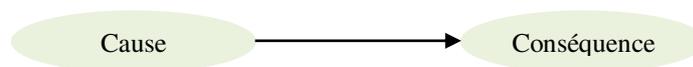


Figure 31. Graphe bayésien causal.

La construction d'un réseau bayésien est basée sur trois étapes. La première l'étape consiste à l'identification des variables. La seconde étape correspond à définir les arcs du graphe. La troisième étape correspond à spécifier numériquement les distributions de probabilités conditionnelles pour chaque variable définie.

Voici un exemple classique d'un réseau bayésien proposé par [Pearl, 1988] : « Ce matin-là, alors que le temps est clair et sec, M. Holmes sort de sa maison. Il s'aperçoit que la pelouse de son jardin est humide. Il se demande alors s'il a plu pendant la nuit, ou s'il a simplement oublié de débrancher son arroseur automatique. Il jette un coup d'œil sur la pelouse de son voisin, M. Watson, et s'aperçoit qu'elle est également humide. Il en déduit qu'il a probablement plu et décide de partir au travail sans vérifier son arroseur automatique ».

Le réseau bayésien est composé de 4 nœuds : Arroseur (A), Pluie (P), Jardin humide (J), Jardin du voisin humide (W). La Figure 32 montre les variables et la structure du graphe, ainsi que les distributions de probabilités conditionnelles associées à chaque nœud (les nœuds J et W sont déterministes c'est-à-dire leurs probabilités est égale à 0 ou 1).

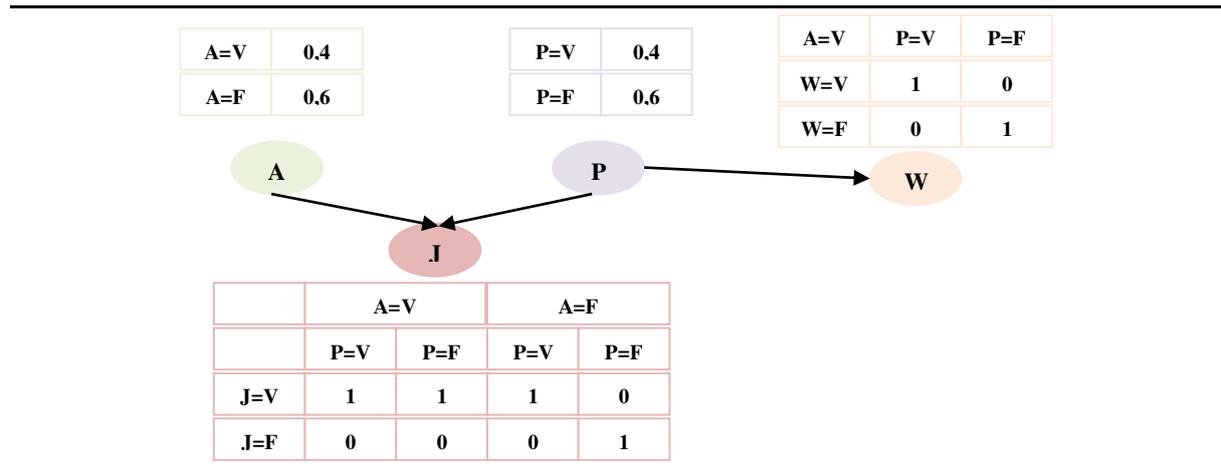


Figure 32. Exemple d'un réseau bayésien.

L'inférence bayésienne consiste à calculer la probabilité a posteriori au niveau de certaines variables en prenant en compte d'autres variables (observations). Nous commençons par affecter des valeurs aux variables d'observation, puis nous utilisons un algorithme d'inférence pour calculer les probabilités a posteriori des autres variables.

Soit un réseau bayésien dont l'ensemble des nœuds est $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. Les algorithmes d'inférence bayésiens permettent de calculer les probabilités a posteriori $P(X_i | Y)$ d'une variable X_i sachant les observations Y , avec $Y \subset X$ et $X_i \notin Y$.

5.3. Estimation qualitative de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO : notre modèle de crédibilité

En nous basant sur l'état de l'art établi et les spécificités de CAPTAIN MEMO, nous proposons notre **propre modèle d'évaluation de la crédibilité des données saisies** dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Il se fonde sur **un ensemble de dimensions permettant d'évaluer qualitativement la crédibilité de ces données**. Nous proposons les dimensions suivantes : « **caractère raisonnable de la donnée** » et « **fiabilité de l'auteur** ». Les deux dimensions « **fiabilité du malade d'Alzheimer** » et « **fiabilité d'un utilisateur de l'entourage du malade** » héritent de la dimension « **fiabilité de l'auteur** ». Pour chacune des dimensions, nous associons un ensemble de sous-dimensions, comme le montre la Figure 33.

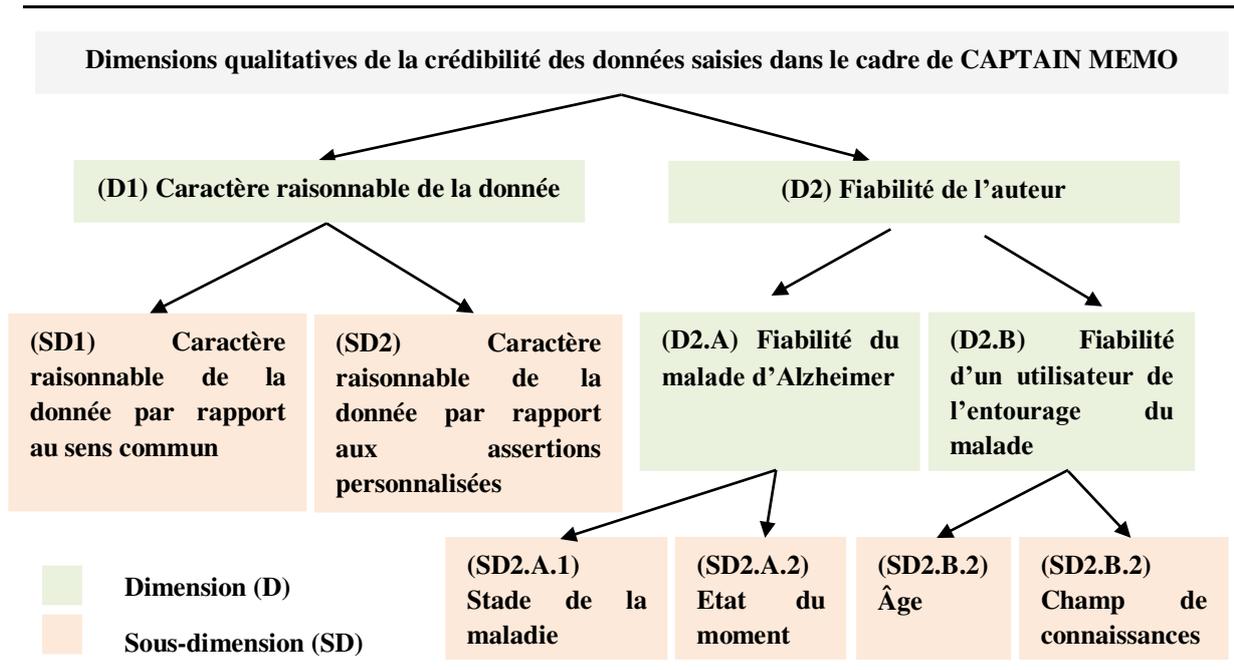


Figure 33. Notre modèle de crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.

Dans les sections qui suivent, nous présentons chacune des dimensions ainsi que leurs sous-dimensions associées.

5.3.1. « Caractère raisonnable de la donnée »

Nous définissons la dimension « caractère raisonnable de la donnée » comme **la vraisemblance de la donnée par rapport à un ensemble d'assertions de vérification**. Grâce à ces dernières, nous ne pouvons pas affirmer la véracité d'une donnée, mais seulement sa vraisemblance. Cependant, nous pouvons affirmer sa fausseté.

[Lee et al., 2006] et [Prat et Madnick, 2008] estiment le caractère raisonnable d'une donnée en se fondant sur un ensemble d'assertions de vérification proposées par rapport au sens commun. Cependant, la crédibilité des données dépend de l'expérience et des préférences de l'utilisateur [Watts et al., 2009]. Nous distinguons les **assertions de vérification par rapport au sens commun** et les **assertions de vérification personnalisées**. Par la suite, nous distinguons les deux sous-dimensions permettant l'évaluation du « caractère raisonnable de la donnée » suivantes :

- « **Caractère raisonnable de la donnée par rapport au sens commun** » : cette sous-dimension reflète seulement **la vraisemblance de la donnée vis-à-vis un ensemble d'assertions de vérification proposées par rapport au sens commun**.

Par exemple, le malade d'Alzheimer saisit qu'Olivier est le père de Pierre. Si l'assertion de vérification du sens commun qui concerne l'âge du père et l'âge du fils (l'âge du père doit être supérieur à l'âge du fils) n'est pas vérifiée, nous affirmons la fausseté de cette donnée. Dans le cas contraire, nous ne pouvons pas affirmer sa véracité, mais seulement son caractère vraisemblable ;

- « **Caractère raisonnable de la donnée par rapport aux assertions de vérification personnalisées** » : il reflète la **vraisemblance d'une donnée par rapport à un ensemble d'assertions de vérification personnalisées**. Une assertion de vérification personnalisée est vraie à une certaine probabilité (poids de l'assertion) et sous certaine(s) condition(s). Dans le cadre de CAPTAIN MEMO, ces assertions dépendent de **la culture et de la langue**. Un premier exemple concerne la polygamie qui est autorisée dans certains pays et interdite dans d'autres. Si le patient d'Alzheimer, vivant en France, saisit qu'il est marié à deux femmes en même temps, en nous basant sur l'assertion de vérification personnalisée concernant le nombre d'épouses possibles, nous affirmons que cette donnée est fausse. Cette assertion n'est pas valide si le patient habite dans un pays autorisant la polygamie (par exemple : les pays du Golfe). Un deuxième exemple concerne les prénoms du père et du fils. En effet, en Angleterre, le prénom du fils est généralement celui du père. Pour d'autres pays, ce n'est pas le cas. Par la suite, le poids de l'assertion de vérification (le prénom du père est le même que celui du fils) dépend du pays. Un troisième exemple concerne la relation de cousinage. En effet, en langue française, il existe, selon le genre masculin ou féminin, deux termes pour qualifier cette relation : cousin et cousine. En langue anglaise, il existe uniquement un seul terme qui permet de la qualifier : cousin. Donc nous ne pouvons pas associer une assertion de vérification qui concerne le genre masculin ou féminin pour vérifier une relation de cousinage saisie en langue anglaise.

5.3.2. « Fiabilité de l'auteur »

La « fiabilité de l'auteur » reflète la **fiabilité accordée à celui qui introduit la donnée au moment de la saisie**. Nous identifions deux principaux auteurs :

- Le malade d'Alzheimer et
- Un utilisateur membre de son entourage, tel que son petit-fils, l'infirmière, son voisin, son conjoint ou son ami.

Nous identifions donc deux dimensions qui héritent de la dimension « fiabilité de l'auteur » : « **fiabilité du malade d'Alzheimer** » et « **fiabilité d'un utilisateur membre de l'entourage du malade d'Alzheimer** ».

5.3.2.1. « Fiabilité du malade d'Alzheimer »

Pour évaluer la « fiabilité du malade d'Alzheimer », nous identifions les deux sous-dimensions suivantes :

- « **Stade de la maladie d'Alzheimer** » : la fiabilité du malade d'Alzheimer dépend de la progression de la maladie d'Alzheimer. En effet, cette maladie se caractérise par une diminution graduelle des facultés mentales et psychologiques. Par exemple, nous nous focalisons sur le déclin de la mémoire. Dans un premier temps, c'est surtout la mémoire à court terme qui est affectée. La maladie n'affecte pas que dans un second temps la mémoire à long terme [Farage et al., 2012]. Par la suite, au fur et à mesure que cette maladie progresse, la fiabilité du malade d'Alzheimer décline ;
- « **État du moment** » : la fiabilité du malade d'Alzheimer dépend de l'état de sa mémoire au moment de la saisie de la donnée. En effet, cette maladie est ponctuée de périodes de lucidité et de moments d'égarement. Chez la plupart des patients, les périodes de totale lucidité alternent avec des moments d'égarement, d'abord occasionnels, puis de plus en plus fréquents.

5.3.2.2. « Fiabilité d'un utilisateur membre de l'entourage du malade d'Alzheimer »

Pour évaluer la « fiabilité d'un utilisateur membre de l'entourage du malade d'Alzheimer », nous proposons les deux sous-dimensions suivantes :

- « **Âge** » : la fiabilité d'un utilisateur membre de l'entourage du malade d'Alzheimer dépend de son âge. Comme premier exemple, nous ne pouvons pas totalement compter sur le petit-fils de six ans pour alimenter la prothèse de sa grand-mère par les données demandées. Comme second exemple, nous ne pouvons pas totalement compter sur le conjoint âgé de quatre-vingt-dix ans pour qu'il se souvienne de toutes les données nécessaires ;
- « **Champ de connaissances** » : la fiabilité d'un utilisateur membre de l'entourage du malade d'Alzheimer dépend de ses champs de connaissances. Par exemple, nous pouvons compter sur la conjointe du malade pour saisir les données qui concernent

les ascendants et les descendants de son conjoint. Cependant, nous ne comptons pas sur elle pour saisir des données concernant ses amis d'enfance.

Ces **dimensions permettent d'évaluer qualitativement la crédibilité des données saisies** dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Dans la section suivante, nous présentons **notre approche DBE_ALZ pour estimer quantitativement la crédibilité de ces données**.

5.4. Estimation quantitative de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO : notre approche DBE_ALZ

Cette section présente notre approche DBE_ALZ qui permet **d'estimer quantitativement la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO**. Elle est **basée sur notre modèle de crédibilité des données**. Pour chaque sous-dimension, nous définissons une métrique pour l'estimer quantitativement. La Figure 34 résume cette approche. Pour chaque donnée saisie par le malade d'Alzheimer ou son entourage, notre approche permet de générer un degré de crédibilité C ($C \in [0, 1]$, 0 et 1 représentent, respectivement, complètement non crédible et complètement crédible). Ce dernier est sauvegardé en tant qu'étiquette associée à la donnée saisie dans la base de connaissances du propriétaire de la prothèse. DBE_ALZ est basée sur le raisonnement flou et le raisonnement incertain.

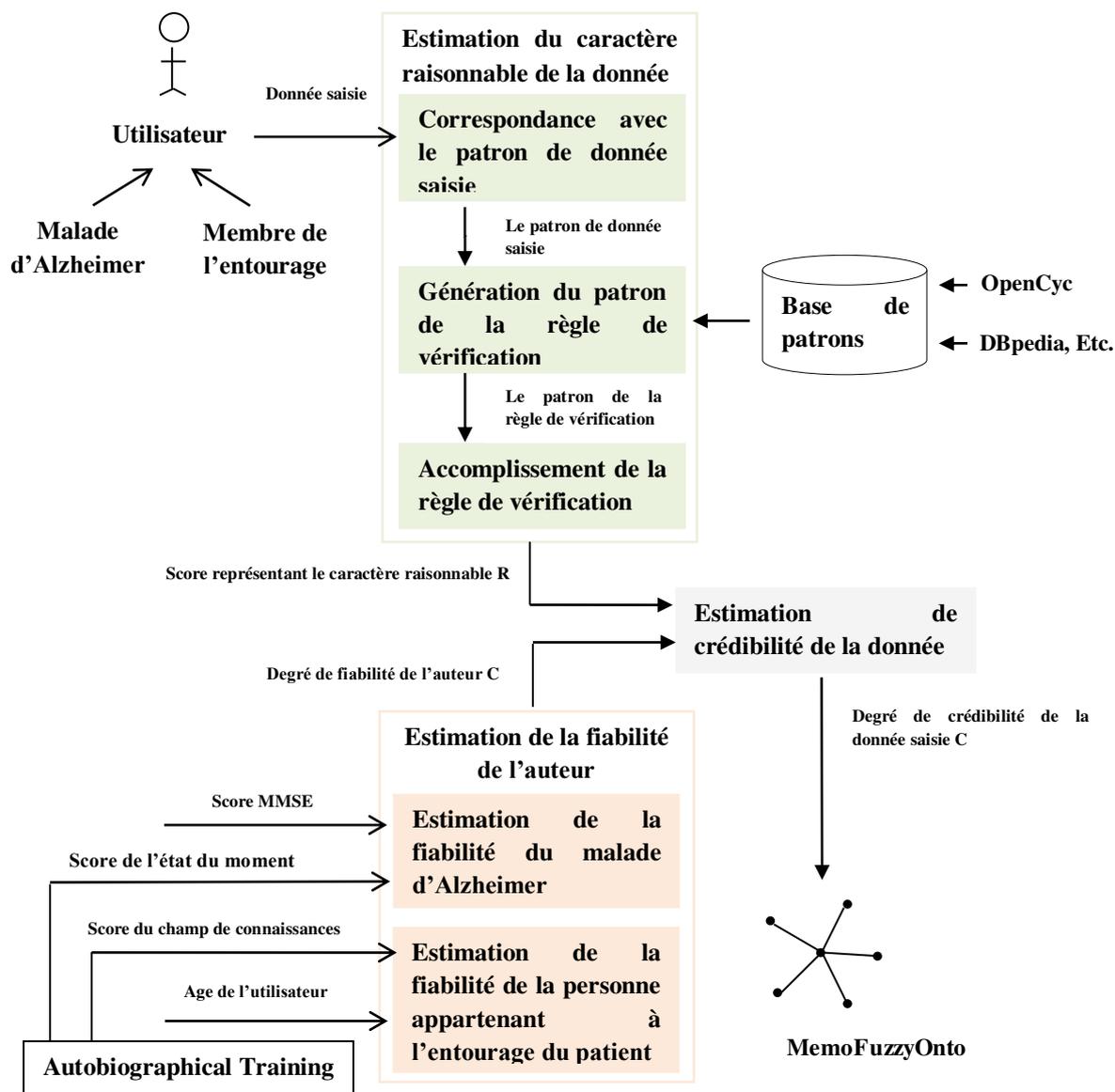
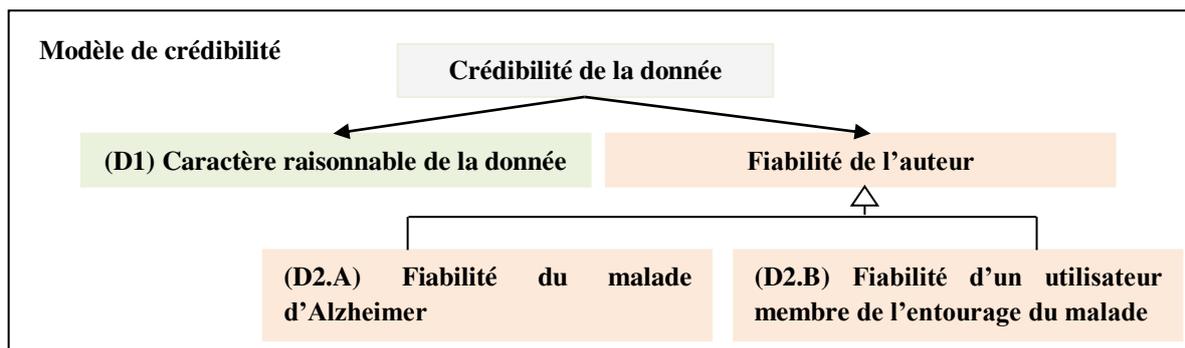


Figure 34. Notre approche DBE_ALZ.

5.4.1. Modules

Notre approche DBE_ALZ présente trois modules : « **estimation du caractère raisonnable de la donnée** », « **estimation de la fiabilité de l’auteur** » et « **estimation de la crédibilité de la donnée** ».

5.4.1.1. « Estimation du caractère raisonnable de la donnée »

Le but de ce module est de générer **un score représentant le caractère raisonnable de la donnée** R ($R \in [0, 1]$, 0 et 1 représentent, respectivement, complètement non raisonnable et complètement raisonnable). Il est déterminé en se basant sur **une règle de vérification** que nous avons définie à partir d’un **ensemble d’assertions de vérification personnalisées et relatives au sens commun**.

Ce module est basé sur l’utilisation des **patrons**. Nous avons recours aux **réseaux bayésiens pour raisonner à partir des données et des règles incertaines**.

Ce module est formé par trois sous-modules : « **correspondance avec le patron de la donnée saisie** », « **génération du patron de la règle de vérification** » et « **accomplissement de la règle de vérification** ».

5.4.1.1.1. « Correspondance avec le patron de la donnée saisie »

Ce sous-module prend en entrée la donnée saisie I_K et **renvoie en sortie son patron associé** P_{IK} grâce à un processus de correspondance avec la base préétablie de patrons de données saisies $P_I = \{P_{I1}, P_{I2} \dots P_{IN}\}$.

Nous présentons deux exemples dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Comme premier exemple, si nous avons la donnée saisie suivante : « Philippe est le père de Pierre ». Le patron associé à cette dernière est « Personne X père Personne Y » ; avec « Personne X » et « Personne Y » représentent deux instances de la classe « Personne » de l’ontologie MemoFuzzyOnto. « Père » représente une propriété d’objet. Comme second exemple, si nous avons la donnée saisie « Maya est ma cousine ». Le patron associé est « Personne X cousine Le Patient ». « Le Patient » représente une instance de la classe « Patient ».

5.4.1.1.2. « Génération du patron de la règle de vérification »

Ce sous-module prend en entrée le patron de la donnée saisie P_{IK} ainsi que la donnée saisie I_K et **renvoie en sortie le patron de la règle de vérification** P_{RK} .

$P_R = \{P_{R1}, P_{R2} \dots P_{RN}\}$ est une base de patrons de règles de vérification. Pour chaque patron de données saisies I_{PK} , un patron de règle de vérification P_{RK} est associé. Un patron de règle de vérification a la structure suivante :

$$SI P_{IK} ALORS A_{K/1} \dots A_{K/N}$$

La clause ALORS est une conjonction de N assertions de vérification $A_{K/I}$ qui doivent être accomplies pour que la donnée saisie I_K soit complètement raisonnable. Par exemple, l'âge du père doit être supérieur à celui de son fils est une des assertions de vérification associées au patron de données saisies qui concerne la relation de paternité mentionnée dans la section précédente. En nous fondant sur notre modèle de crédibilité présenté dans la section 5.3, les assertions de vérification peuvent être personnalisées ou relatives au sens commun.

Pour la définition des assertions relatives au sens commun, nous avons recours à l'ontologie du sens commun OpenCyc³² proposée par le projet Cyc. Sa dernière version open source, OpenCyc (4.0), a été publiée en 2012. Cette version comprend environ 239 000 termes et 2093000 triplets. Certains de ces termes sont alignés avec d'autres ontologies/taxonomies externes comme DBpedia et WordNet [Miller et Fellbaum, 1998].

Chaque assertion de vérification $A_{K/I}$ a un poids $W_{K/I}$ qui détermine à quel degré elle est valide ($W_{K/I} \in [0, 1]$, avec 1 et 0 représentant, respectivement, complètement valide et complètement invalide). Une assertion de vérification relative au sens commun $A_{K/I}$ a un poids égal à 1 ($W_{K/I} = 1$). Le poids $W_{K/I}$ d'une assertion de vérification personnalisée est déterminé en exploitant les données ouvertes liées les plus connues, à savoir DBpedia et Freebase³³. Pour chaque assertion de vérification personnalisée, une ou plusieurs requêtes SPARQL sont générées.

Une assertion de vérification $A_{K/I}$ est définie en se basant sur l'un des deux patrons suivants :

$$P_{A1} = \{(V_1)_{CI}, OP, (V_2)_{C2}; W_{A1}\}$$

$$P_{A2} = \{(V_1)_{CI}, OP, C; W_{A1}\}$$

Avec, $(V_1)_{CI}$ est une variable qui représente une donnée stockée dans la base de connaissances du malade. CI est le degré de crédibilité associé à cette donnée. C est une

³² <http://www.cyc.com/opencyc/>

³³ <https://developers.google.com/freebase/>

constante. OP est un opérateur tel que =, ≠, <, >, ≤, ≥ ou ∈ et W_{AI} est le poids associé à l’assertion de vérification.

Prenons l’exemple de la donnée saisie concernant la relation de paternité, mentionnée dans la section précédente. Le patron de la règle de vérification associé est le suivant :

SI (“Person X père Person Y”) ALORS ({Age (X) c_1 > Age (Y) c_2 ; $W_{A1}= 1$ } \wedge {Genre (X) c_3 = “homme”; $W_{A2} = 1$ } \wedge {Nom de famille (X) c_4 = Nom de famille (Y) c_5 ; $W_{A3}= 0.99$ } \wedge {Nationalité (X) c_6 = Nationalité (Y) c_7 ; $W_{A4}= 0.99$ } \wedge {Prénom (X) c_8 <> Prénom (Y) c_9 $W_{A5} = 0.99$ }).

5.4.1.1.3. « Accomplissement de la règle de vérification »

Ce module prend en entrée le patron de la règle de vérification P_{RK} déterminé par le sous-module précédent ainsi que la donnée saisie I_K et **renvoie en sortie le score R représentant le caractère raisonnable de la donnée.**

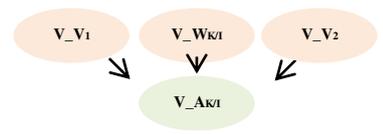
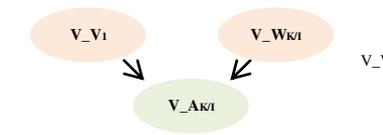
Le patron de la **règle de vérification présente deux sources d’incertitude.** Premièrement, chaque assertion personnalisée est incertaine. La certitude de cette dernière est égale à son poids associé. Deuxièmement, chaque assertion fait référence au moins à une variable V_I qui représente une donnée stockée dans la base de connaissances crédible à un degré CI. La certitude de cette variable est égale au degré de crédibilité CI. C’est pour cela que **nous nous basons sur les réseaux bayésiens pour raisonner à partir de l’incertain.**

Pour chaque assertion $A_{K/I}$, nous associons un patron du réseau bayésien $BN_{K/I}$. Ce patron du réseau bayésien est automatiquement construit en se basant sur le patron de l’assertion de vérification BN_{A1} et BN_{A2} . Nous définissons les trois variables aléatoires suivantes :

- La variable aléatoire V_{V_I} correspond à une variable stockée dans la base de connaissances du malade. La probabilité $P(V_{V_I}=vrai)$ est égale à CI, avec CI correspond au degré de crédibilité sauvegardé en tant qu’ étiquette ;
- La variable aléatoire $V_{W_{K/I}}$ correspond au poids de l’assertion de vérification. La probabilité $P(V_{W_{K/I}}=vrai)$ est égale à $W_{K/I}$;
- La variable aléatoire $V_{A_{K/I}}$ représente la probabilité de l’accomplissement de l’assertion $A_{K/I}$.

Le Tableau 10 montre le patron du réseau bayésien associé à chaque patron d’assertion de vérification.

Tableau 10. Patrons du réseau bayésien associé aux patrons d’assertion.

Patron d’assertion	Patron du réseau bayésien associé
$P_{A1} =$ $\{(V_1)_{C1}, OP, (V_2)_{C2}; W_{A1}\}$	$V_{_W_{k/l}} = \text{Vrai} \mid P(V_{_W_{k/l}}) = W_{k/l}$  $V_{_V1} = \text{Vrai} \mid P(V_{_V1}) = C_1$ $V_{_V2} = \text{Vrai} \mid P(V_{_V2}) = C_2$ $V_{_V1} = \text{Vraie et } V_{_V2} = \text{vrai et } V_{_W_{k/l}} = \text{vrai} \mid P(V_{_A_{k/l}}) = 1$
$P_{A2} =$ $\{(V_1)_{C1}, OP, C; W_{A1}\}$	$V_{_V1} = \text{Vrai} \mid P(V_{_V1}) = C_1$ $V_{_W_{k/l}} = \text{Vrai} \mid P(V_{_W_{k/l}}) = W_{k/l}$  $V_{_V1} = \text{Vraie et } V_{_W_{k/l}} = \text{vrai} \mid P(V_{_A_{k/l}}) = 1$

Pour chaque patron de la règle de vérification P_{RK} , nous associons un patron du réseau bayésien BN_K . Ce dernier est formé par les N réseaux bayésiens $BN_{K/l}$ et une variable aléatoire R . Cette variable dépend des variables aléatoires $V_{_A_{k/l}}$. La Figure 35 montre le patron du réseau bayésien associé au patron de la règle de vérification P_{RK} .

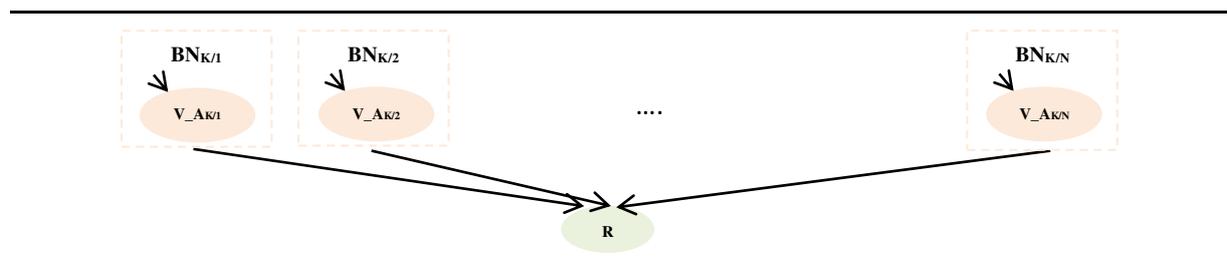


Figure 35. Patron du réseau bayésien associé au patron de la règle de vérification.

Nousinstancions après le patron du réseau bayésien BN_K en nous fondant sur la donnée saisie I_K et les données stockées dans la base de connaissances du patient. En effet, chaque variable $(V_l)_{CI}$, est remplacée par sa valeur et son degré de crédibilité qui sont stockées dans la base de connaissances. La dernière étape consiste à calculer la probabilité a posteriori au niveau de la variable R .

Prenons l’exemple de la donnée saisie concernant la relation de paternité, mentionnée dans la section précédente. $BN_{K/1}$ est le patron du réseau bayésien associé au patron de

l’assertion $A_{K/1} = \{Age(X)_{C1} > Age(Y)_{C2}; W_{A1} = 1\}$. $BN_{K/2}$ est le patron du réseau bayésien associé au patron de l’assertion $A_{K/2} = \{Genre(X)_{C3} = \text{“homme”}; W_{A2} = 1\}$. $BN_{K/3}$ est le patron du réseau bayésien associé au patron de l’assertion $A_{K/3} = \{Nom\ de\ famille(X)_{C4} = Nom\ de\ famille(Y)_{C5}; W_{A3} = 0.99\}$. $BN_{K/4}$ est le patron du réseau bayésien associé au patron de l’assertion $A_{K/4} = \{Nationalité(X)_{C6} = Nationalité(Y)_{C7}; W_{A4} = 0.99\}$. $BN_{K/5}$ est le patron du réseau bayésien associé au patron de l’assertion $A_{K/5} = \{Prénom(X)_{C8} \neq Prénom(Y)_{C9}; W_{A5} = 0.99\}$. Le patron du réseau bayésien associé au patron de la règle de vérification est présenté dans la Figure 36.

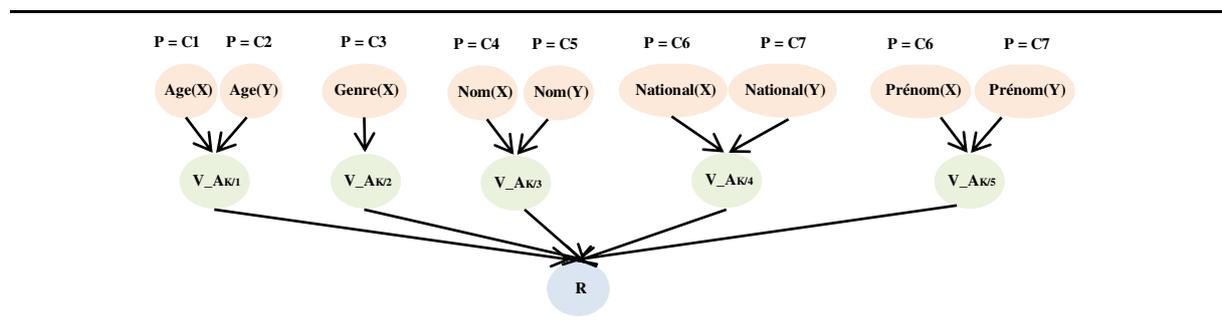


Figure 36. Exemple d’un patron d’un réseau bayésien.

5.4.1.2. « Estimation de la fiabilité de l’auteur »

L’objectif de ce module est d’estimer quantitativement le degré de fiabilité de l’auteur au moment de la saisie de la donnée (malade d’Alzheimer ou un utilisateur de son entourage). Ce dernier est noté F ($F \in [0, 1]$), 0 et 1 représentent, respectivement, complètement non fiable et complètement fiable).

Ce module est formé par deux sous-modules : « estimation de la fiabilité du malade d’Alzheimer » et « estimation de la fiabilité d’un auteur de l’entourage du malade d’Alzheimer ». Le premier est invoqué seulement si le patient est l’auteur de la donnée saisie. Le second est invoqué seulement si l’auteur de la donnée saisie est une personne de son entourage. Ils sont basés sur les systèmes d’inférence floue pour estimer le degré de fiabilité de l’auteur en se basant sur les sous-dimensions de la crédibilité caractérisées par l’imprécision. La méthode choisie pour la défuzzification est le centre de gravité. Toutes les valeurs, présentées dans ce qui suit sont validées par une neurologue de l’hôpital HEDI CHAKER de Sfax en Tunisie.

5.4.1.2.1. « Estimation de la fiabilité du malade d'Alzheimer »

L'objectif est **d'estimer quantitativement le degré de fiabilité du malade d'Alzheimer au moment de la saisie de la donnée.**

Métriques de crédibilité associées

Comme mentionnée dans la section 5.3, l'estimation de la dimension de la crédibilité « fiabilité du malade d'Alzheimer » repose sur les deux sous-dimensions « stade de la maladie d'Alzheimer » et « état du moment ». Nous associons à chacune d'elles une métrique pour l'évaluer quantitativement :

- **La métrique « score MMSE » pour une estimation quantitative de la sous-dimension « stade de la maladie d'Alzheimer »** : il est difficile de déterminer le stade exact de la maladie d'Alzheimer. Dans la littérature, il existe de nombreux tests permettant de nous renseigner sur différents stades de cette maladie. Dans notre travail, nous nous basons sur le Mini Mental State Examination (MMSE). Ce test est particulièrement employé dans la littérature en raison de sa bonne fidélité et validité [Burns et al., 1999]. Nous considérons qu'il existe quatre stades de cette maladie en fonction du score MMSE ;
- **La métrique « score de l'état du moment » pour une estimation quantitative de la sous-dimension « estimation de la fiabilité d'un auteur de l'entourage du malade d'Alzheimer »** : nous définissons cette métrique en nous basant sur le service Autobiographical Training de CAPTAIN MEMO. En effet, au début de chaque session de saisie de données, le patient d'Alzheimer répond à 20 questions générées par Autobiographical Training. Ce dernier génère après un score représentant le pourcentage des réponses correctes. Cette métrique correspond à ce score.

Système d'inférence floue associé

Nous inférons le degré de la fiabilité du malade d'Alzheimer au moment de la saisie de la donnée à partir des deux métriques « score MMSE » et « score de l'état du moment » qui se caractérisent par leurs caractères imprécis. Par la suite, nous avons eu recours à l'inférence approximative. Nous concevons ce module comme un système d'inférence floue de Mamdani qui présente deux variables d'entrée floues (« Variable_Score_MMSE » et

« Variable_Score_Etat_Moment ») et une variable de sortie floue (« Variable_Fiabilité_Malade_Alzheimer »).

La variable d'entrée floue « Variable_Score_MMSE » est pondérée selon le score MMSE du patient. Elle a quatre valeurs linguistiques : {Terminal_Stage, Severe_Stage, Moderate_Stage et Mild_Stage}. Son univers du discours est l'intervalle [0, 30]. La Figure 37 présente les fonctions d'appartenance des quatre valeurs linguistiques.

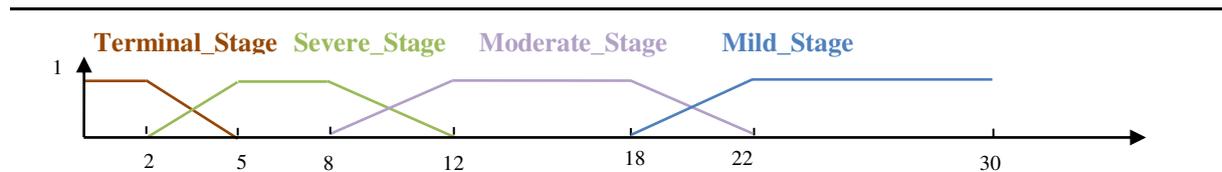


Figure 37. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_MMSE ».

La variable d'entrée floue « Variable_Score_Etat_Moment » est pondérée selon le score représentant le pourcentage des réponses correctes généré par le module Autobiographical Training. Elle a trois valeurs linguistiques : {P_Sévère, P_Modérée et P_Légère}. L'univers du discours est l'intervalle [0, 100]. La Figure 38 présente les fonctions d'appartenance de ces valeurs linguistiques.

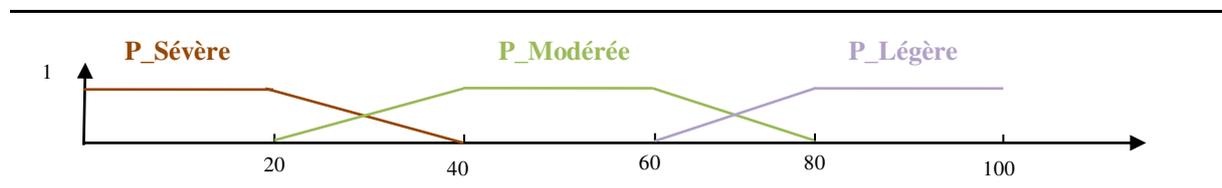


Figure 38. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_Etat_Moment ».

La variable de sortie floue « Variable_Fiabilité_Malade_Alzheimer » représente le degré de la fiabilité du malade d'Alzheimer au moment de la saisie de la donnée. Elle a trois valeurs linguistiques : {F_M_Faible, F_M_Modérée et F_M_Forte}. L'univers du discours est l'intervalle [0, 1]. La Figure 39 présente les fonctions d'appartenance associées.

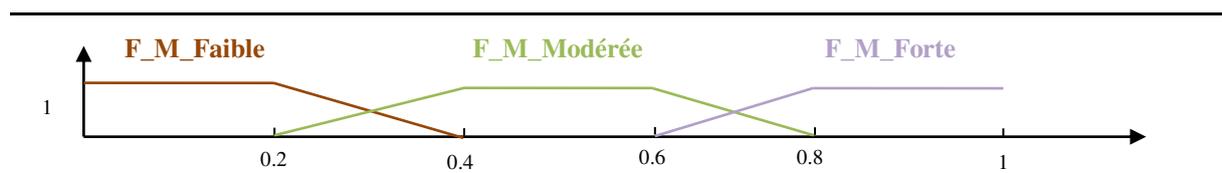


Figure 39. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Fiabilité_Malade_Alzheimer ».

Le Tableau 11 montre la matrice de décision qui résume les règles floues utilisées.

Tableau 11. Matrice de décision du système d'inférence floue du module « estimation de la fiabilité du malade d'Alzheimer ».

		Variable_Score_MMSE			
		Terminal_Stage	Severe_Stage	Moderate_Stage	Mild_Stage
Variable_Score_Etat _Moment	P_Légère	F_M_Modérée	F_M_Modérée	F_M_Forte	F_M_Forte
	P_Modérée	F_M_Faible	F_M_Faible	F_M_Modérée	F_M_Forte
	P_Sévère	F_M_Faible	F_M_Faible	F_M_Faible	F_M_Faible

Exemple : Le but de cet exemple est d'estimer la fiabilité d'un patient d'Alzheimer. Le score MMSE du patient en question est 27. Le score représentant le pourcentage des réponses correctes généré par le service Autobiographical Training est 86%. La fiabilité du patient est inférée en se basant sur ces deux scores. Elle est estimée à 0.81.

5.4.1.2.2. « Estimation de la fiabilité d'un auteur de l'entourage du malade d'Alzheimer »

L'objectif de ce module est **d'estimer quantitativement le degré de la fiabilité de toute personne de l'entourage du malade d'Alzheimer qui alimente la prothèse de mémoire** (par exemple : le conjoint, l'ami, le voisin, le petit-fils, la fille, le gendre, etc.).

Métriques de crédibilité associées

Comme mentionnée dans la section 5.3, l'estimation de la fiabilité d'un auteur de l'entourage du malade d'Alzheimer repose sur deux sous-dimensions : « champ de connaissances » et « âge ». Nous associons à chacune d'elles une métrique qui permet de l'évaluer quantitativement :

- **Métrique de crédibilité « score du champ de connaissances » pour l'estimation quantitative de la sous-dimension « champ de connaissances » :** nous définissons cette métrique en se basant sur le service Autobiographical Training de CAPTAIN MEMO. Pour chaque donnée saisie, l'utilisateur répond à quelques questions générées par le service Autobiographical Training. Ces questions ont le même thème (champs) que la donnée saisie. Ce dernier génère après un score représentant le pourcentage des réponses correctes. Cette métrique correspond à ce score ;
- **Métrique de la crédibilité « score de la fiabilité à partir de l'âge » pour l'estimation quantitative de la sous-dimension « âge » :** nous définissons cette

métrique pour estimer quantitativement la fiabilité d'un utilisateur de l'entourage du propriétaire de la prothèse de mémoire en nous basant sur son âge. Nous considérons que tous les utilisateurs âgés de moins de six ans et de plus que quatre-vingt-dix ans sont non fiables. Les utilisateurs âgés entre trente et soixante ans sont très fiables.

Système d'inférence floue associé

Nous inférons le degré de la fiabilité du malade d'Alzheimer à partir des deux métriques de crédibilité « score du champ de connaissances » et « score de la fiabilité à partir de l'âge » caractérisées par leurs caractères imprécis. Nous concevons ce module comme un système d'inférence floue de Mamdani qui a deux variables d'entrée floues (« Variable_Score_Champs_Connaissances » et « Variable_Score_Fiabilité_Age ») et une variable de sortie floue (« Variable_Fiabilité_Entourage_Alzheimer »).

La variable d'entrée floue « Variable_Score_Champs_Connaissances » est pondérée selon le score représentant le pourcentage des réponses correctes généré par le service Autobiographical Training pour le champ de connaissances en question. Elle présente trois valeurs linguistiques : {C_Faible, C_Modérée et C_Forte}. Son univers du discours est l'intervalle [0, 100]. La Figure 40 présente les fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques.

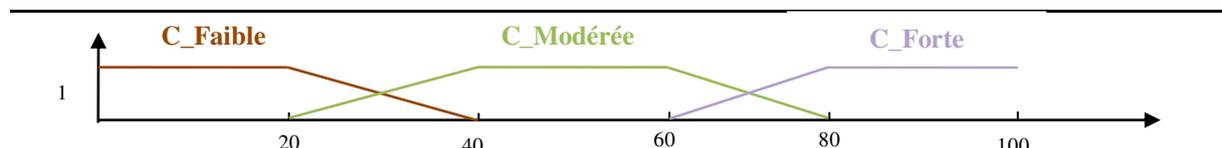


Figure 40. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_Champs_Connaissances ».

La variable d'entrée floue « Variable_Score_Fiabilité_Age » est pondérée selon l'âge de l'utilisateur. Elle présente deux valeurs linguistiques : {Age_Fiabilité et Age_Non_Fiabilité}. Son univers du discours est l'intervalle [0, 100]. La Figure 41 présente les fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques.

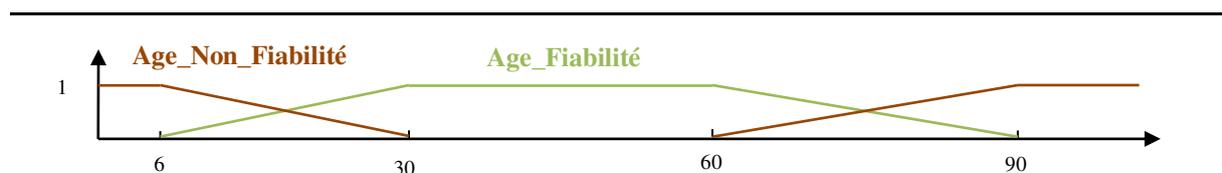


Figure 41. Fonction d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Score_Fiabilité_Age ».

La variable de sortie floue « Variable_Fiabilité_Entourage_Alzheimer » représente le degré de la fiabilité du malade d'Alzheimer. Elle présente trois valeurs linguistiques : {F_E_Faible, F_E_Modérée et F_E_Forte}. Son univers du discours est l'intervalle [0, 1]. La Figure 42 présente les fonctions d'appartenance des quatre valeurs linguistiques.

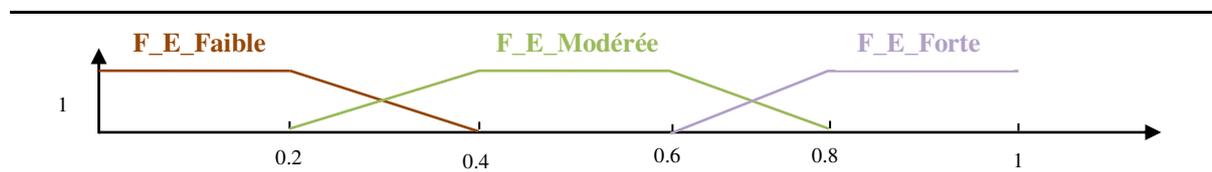


Figure 42. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Fiabilité_Entourage_Alzheimer ».

Le tableau suivant montre la matrice de décision qui résume l'ensemble des règles floues utilisées.

Tableau 12. Matrice de décision du système d'inférence floue du module « estimation de la fiabilité d'un auteur de l'entourage du malade d'Alzheimer ».

		Variable_Score_Champs_Connaissances		
		C_Faible	C_Modérée	C_Forte
Variable_Score_Fiabilité_Age	Age_Fiabilité	F_E_Modérée	F_E_Modérée	F_E_Forte
	Age_Non_Fiabilité	F_E_Faible	F_E_Faible	F_E_Modérée

Exemple : Le but de cet exemple est d'estimer la fiabilité d'un utilisateur de l'entourage du patient d'Alzheimer. L'âge de cette personne est 32. Le score représentant le pourcentage des réponses correctes généré par le service Autobiographical Training est 95%. La fiabilité de cet utilisateur est estimée à 0,96.

5.4.1.3. « Estimation de la crédibilité de la donnée »

L'objectif de ce module est d'**estimer quantitativement le degré de crédibilité C de la donnée saisie**. Comme mentionnée dans la section 5.3, l'estimation de la crédibilité de la donnée repose sur deux dimensions : « fiabilité de l'auteur » et le « caractère raisonnable de la donnée ». Ce module prend en entrée les sorties des deux autres modules qui se caractérisent par leurs caractères imprécis. Nous le concevons comme un système d'inférence floue de Mamdani. Il a deux variables d'entrée floues (« Variable_Caractère_Raisonnable » et « Variable_Fiabilité_Auteur ») et une variable de sortie floue (« Variable_Crédibilité_Donnée »).

La variable d'entrée floue « Variable_Caractère_Raisonnable » est pondérée selon le score représentant le caractère raisonnable de la donnée saisie généré par le module « estimation du caractère raisonnable de la donnée ». Elle présente trois valeurs linguistiques : {R_Faible, R_Moyenne et R_Elevé}. Son univers du discours est l'intervalle [0, 1]. La Figure 43 présente les fonctions d'appartenance des trois valeurs linguistiques.

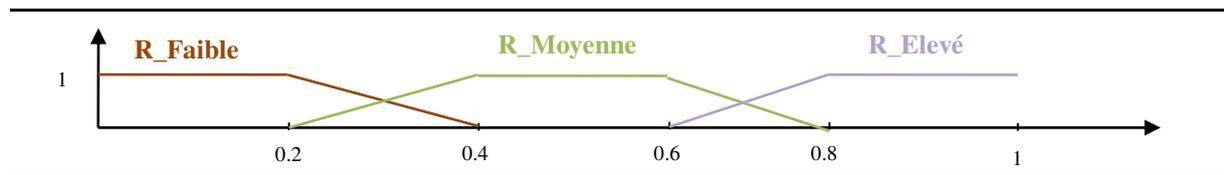


Figure 43. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Caractère_Raisonnable ».

La variable d'entrée floue « Variable_Fiabilité_Auteur » est pondérée selon le degré de la fiabilité de l'auteur généré par le module « estimation de la fiabilité de l'auteur ». Cette variable présente trois valeurs linguistiques : {F_Faible, F_Moyenne et F_Elevé}. L'univers du discours est l'intervalle [0, 1]. La Figure 44 présente les fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques.

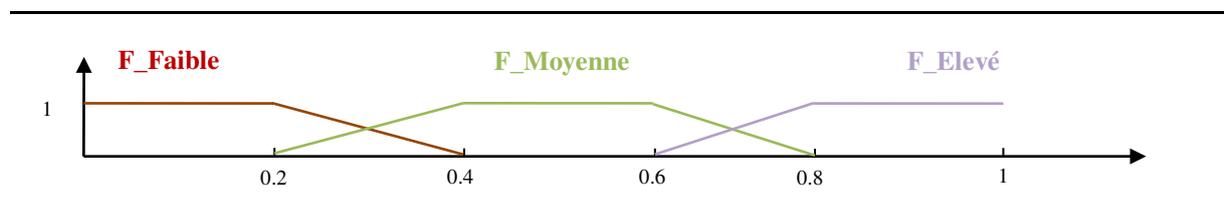


Figure 44. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Fiabilité_Auteur ».

La variable de sortie floue « Variable_Crédibilité_Donnée » représente le degré de crédibilité C de la donnée saisie. Cette variable présente trois valeurs linguistiques : {C_Faible, C_Modérée et C_Forte}. Son univers du discours est l'intervalle [0, 1]. La Figure 45 présente les fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques.

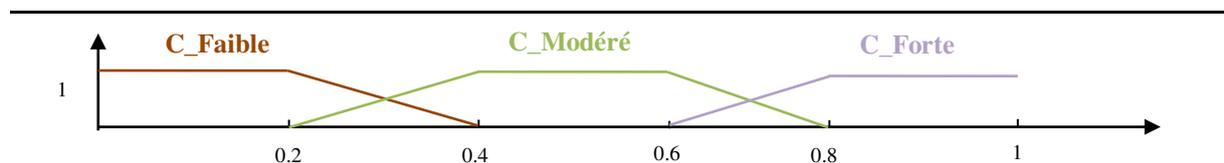


Figure 45. Fonctions d'appartenance des valeurs linguistiques de « Variable_Crédibilité_Donnée ».

Tableau 13. Matrice de décision du système d'inférence floue du module « estimation de la crédibilité de la donnée ».

		Variable_Caractère_Raisonnable		
		R_Faible	R_Moyenne	R_Elevé
Variable_Fiabilité_Auteur	F_Faible	C_Faible	C_Faible	C_Modérée
	F_Moyenne	C_Faible	C_Modérée	C_Modérée
	F_Elevé	C_Modérée	C_Modérée	C_Forte

5.4.2. Algorithme général

L'algorithme général de notre approche DBE_ALZ est le suivant :

Entrée : Une donnée saisie I_K .

Sortie : Le degré de crédibilité C .

La couche de données : La base des patrons de données saisies P_I , La base des patrons de règles de vérification P_R , La base des patrons des assertions de vérification, La base des patrons des réseaux bayésiens.

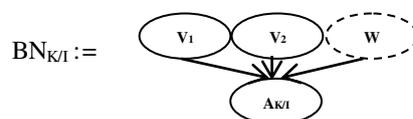
Pour chaque donnée saisie I_K **faire**

1. Estimer le score représentant le caractère raisonnable de la donnée saisie R ;
 - 1.1. Déterminer le patron de la donnée saisie P_{IK} en se fondant sur la base préétablie P_I ;
 - 1.2. Déterminer le patron de la règle de vérification P_{RK} associé au patron de la donnée saisie P_{IK} , en se basant sur la base préétablie P_R ;
 - 1.3. Estimer le score représentant le caractère raisonnable R en se basant sur la règle de vérification P_{RK}

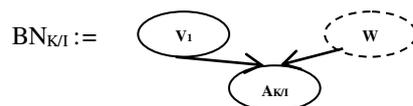
1.3.1. Pour chaque patron d'assertion de la règle de vérification P_{RK} **faire**

Associer un patron de réseau bayésien $BN_{K/I}$ représentant le degré d'accomplissement de l'assertion ;

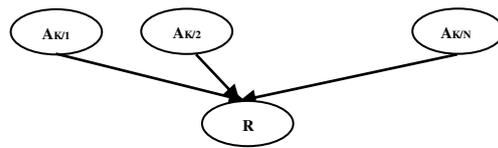
Si le patron de l'assertion correspond à A_{P1}



Si non



- 1.3.2. Générer le patron du réseau bayésien BN générant le score représentant le caractère raisonnable R . BN est formé des N réseaux bayésiens $BN_{K/I}$ et une variable aléatoire R dépendant des N variables $A_{K/I}$.
-



1.3.3. Instancier le réseau bayésien BN en se basant sur les données stockées dans la base de connaissances du patient.

1.3.4. Calculer la probabilité a posteriori au niveau de la variable R.

2. Estimer le degré de la fiabilité F de l'auteur de la donnée saisie I_K

Si (le malade d'Alzheimer est l'auteur) **Alors**

2.1. Inférer, en se fondant sur le raisonnement flou, le degré de la fiabilité F à partir des deux métriques : « score du Mini Mental State Examination (MMSE) » « score de l'état du moment » ;

Si non

2.2. Inférer, en se fondant sur le raisonnement flou, le degré de la fiabilité F à partir des deux métriques : « score du champ de connaissances » et « score de la fiabilité à partir de l'âge » ;

3. Inférer, en se fondant sur le raisonnement flou, le degré de crédibilité C de la donnée saisie I_K à partir du score représentant le caractère raisonnable de la donnée R et du degré de la fiabilité de l'auteur F .

4. Stocker dans la base de connaissances du patient d'Alzheimer le degré de crédibilité C en tant qu'étiquette associée à la donnée saisie I_K .

Fin pour.

Algorithme 3. Notre approche DBE_ALZ.

5.4.3. Mise en œuvre

Nous implémentons un prototype mettant en œuvre notre approche DBE_ALZ. Il est basé sur la plateforme **J2EE**, une architecture **3-tiers** et le modèle **MVC**. Nous utilisons le serveur d'application Glassfish et le serveur HTTP Apache.

L'architecture générale de notre prototype est basée sur une architecture 3-tiers (présentation, traitement, stockage de données). La couche présentation (1-tiers) a en charge la présentation des interfaces utilisateurs du prototype et le dialogue avec le serveur de traitement. C'est le navigateur web. La couche traitement (2-tiers) est l'implémentation de l'approche DBE_ALZ. Cette couche fait référence au module Autobiographical Training. La couche de données (3-tiers) englobe les données du prototype proposé. Les données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO ainsi que les degrés de crédibilité associés sont stockés selon l'ontologie MemoFuzzyOnto. Elle englobe aussi les bases de patrons utilisés, l'ontologie OpenCyc et les jeux de données ouvertes liées.

Nous utilisons les trois bibliothèques Java suivantes :

- La bibliothèque **JENA** : nous avons recours à cette bibliothèque pour la récupération des données nécessaires à l'instanciation du réseau bayésien et le stockage des données saisies ainsi que les étiquettes associées qui représentent les degrés de crédibilité ;
- La bibliothèque **JavaBayes** [Cozman, 2001] : elle permet d'implémenter les réseaux bayésiens. Nous avons recours à cette bibliothèque pour implémenter le module « estimation du caractère raisonnable de la donnée saisie » ;
- La bibliothèque **jFuzzyLogic** [Cingolani et Alcalá-Fdez, 2012] : c'est une bibliothèque Java implémentant les spécifications du Fuzzy Control Language (FCL) (en français « Langage de contrôle flou »), ce qui permet de concevoir facilement des contrôleurs flous sous forme de fichiers FCL. Nous avons recours à cette bibliothèque pour implémenter les deux modules qui permettent l'estimation du degré de la fiabilité de l'auteur de donnée saisie.

5.5. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous **estimons qualitativement et quantitativement la crédibilité des données saisies** par l'utilisateur (malade d'Alzheimer ou un utilisateur membre de son entourage) dans le cadre de CAPTAIN MEMO. En effet, cet utilisateur peut saisir des données fausses (dus principalement à la discordance mnésique causée par la maladie d'Alzheimer). La présence de ces données affecte défavorablement la qualité des services offerts. Nous nous basons sur notre méthodologie de l'estimation et l'amélioration de la qualité des données.

La fausseté des données est due aux types d'imperfection suivants : l'incertitude, la confusion, l'erreur de la saisie et la connaissance erronée. La dimension de la qualité associée est la crédibilité. Cependant, la définition de cette notion dépend du domaine. À notre connaissance, il n'existe pas de travaux qui permettent d'estimer qualitativement et quantitativement la crédibilité des données saisies dans le cadre des applications pour les malades d'Alzheimer.

La première étape de notre travail consiste à proposer un modèle de crédibilité qui définit un ensemble de dimensions permettant d'évaluer qualitativement la crédibilité des

données saisies. Ces dimensions sont relatives au caractère raisonnable de la donnée et à la fiabilité de l'auteur.

La deuxième étape consiste à proposer l'approche DBE_ALZ qui permet d'estimer quantitativement la crédibilité de ces données en basant sur notre modèle de crédibilité. Elle repose sur l'utilisation des systèmes d'inférence floue et des réseaux bayésiens pour générer un degré de crédibilité associé à chaque donnée saisie. Ce dernier est sauvegardé en tant qu'étiquette dans la base de connaissances du patient.

Un prototype est implémenté pour mettre en œuvre notre approche. Les chercheurs peuvent s'inspirer de notre travail pour estimer la crédibilité des données saisies dans d'autres applications pour les malades d'Alzheimer.

Plus loin, dans le septième chapitre, nous intégrerons notre approche DBE_ALZ dans le prototype de CAPTAIN MEMO. En nous basant sur les degrés de crédibilité estimés, nous fixerons un ensemble d'actions correctives visant à assurer la qualité de ses services. Puis, nous évaluerons cette approche dans le contexte de cette dernière.

Le chapitre suivant (chapitre 6) traite d'un autre type d'imperfection : l'imprécision des données temporelles.

CHAPITRE 6 :

**Prise en compte de l'imprécision dans
les dates et les intervalles de temps :
représentation et raisonnement**

6.1. Introduction

« Les informations temporelles sont souvent de nature graduelle et exprimées d'une manière linguistique et qualitative » [Gammoudi et al., 2017]. Dans CAPTAIN MEMO, nous avons remarqué que les utilisateurs – les patients comme les membres de l'entourage - **expriment généralement les données temporelles d'une manière imprécise**. Nous devons donc savoir représenter et raisonner sur ces données stockées dans l'ontologie MemoFuzzyOnto.

L'état de l'art montre qu'il existe plusieurs travaux qui traitent la modélisation et le raisonnement sur les données temporelles dans l'ontologie. Cependant, à notre connaissance, ces travaux se focalisent seulement sur des **données temporelles précises (pas de prise en compte de l'imprécision)**.

Dans le présent travail, nous nous focalisons seulement sur la **présentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le contexte de l'ontologie**. Un intervalle temporel imprécis désigne « un intervalle de temps classique où les bornes sont définies d'une manière imprécise » [Gammoudi et al., 2017] (par exemple : « la période allant de la fin des années 50 au début des années 80 »).

Dans ce chapitre, nous présentons deux approches pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans une ontologie OWL.

Notre première approche permet la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une **vue précise (une ontologie et un raisonneur précis)**. Premièrement, nous **étendons l'approche 4D-fluents** pour modéliser ces intervalles et les relations temporelles qualitatives précises entre ces derniers. Deuxièmement, nous **étendons l'algèbre des intervalles d'Allen** pour comparer les intervalles temporels imprécis avec une **vue précise**, c'est-à-dire les relations résultantes sont précises. Enfin, nous inférons, via un ensemble de **règles SWRL**, notre extension de l'algèbre d'Allen dans le contexte d'une ontologie précise formalisée en **OWL 2**.

Notre seconde approche permet la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une **vue floue (une ontologie et un raisonneur flous)**. Premièrement, nous **étendons l'approche 4D-fluents** pour représenter ces intervalles et les relations temporelles qualitatives imprécises qui peuvent exister entre eux. Deuxièmement,

nous **étendons l'algèbre d'Allen** avec une **vue graduelle, personnalisée et floue** pour raisonner sur les intervalles temporels imprécis. Finalement, nous déduisons les relations résultantes dans le contexte de l'ontologie floue formalisée en **Fuzzy-OWL 2** en utilisant un ensemble de règles **IF-THEN de Mamdani**.

Ce chapitre est structuré comme suit. Dans la section 6.2, nous présentons l'état de l'art. Les sections 6.3 et 6.4 présentent nos approches pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis. Dans la dernière section, nous terminons par une conclusion et quelques perspectives.

6.2. État de l'art

Cet état de l'art aborde trois volets : les formalismes temporels qualitatifs, une revue de la littérature sur les approches permettant la modélisation de la dimension temporelle dans l'ontologie et une revue de la littérature sur les travaux étendant l'algèbre d'Allen.

6.2.1. Formalismes temporels qualitatifs

Nous présentons deux formalismes temporels qualitatifs les plus cités : l'algèbre des intervalles d'Allen et l'algèbre des points de Vilain et Kautz [Vilain et Kautz, 1986].

6.2.1.1. Algèbre des intervalles d'Allen

Allen a défini 13 relations de base qui décrivent toutes les manières possibles d'ordonner les extrémités de deux **intervalles temporels précis**. Ces relations, dites relations d'Allen, sont habituellement dénotées par : Before (B), After (A), Meets (M), Met-by (MI), Overlaps (O), Overlapped-by (OI), During (D), Contains (DI), Starts (S), Started-by (SI), Finishes (F), Finished-by (FI), et Equal (EQ).

Soit $I = [I^-, I^+]$ et $J = [J^-, J^+]$ deux intervalles temporels précis non réduits à un point. Les relations d'Allen peuvent être définies à partir des trois relations ordinaires entre les bornes des deux intervalles à positionner l'un par rapport à l'autre. Par exemple, la déclaration I Starts J correspond à :

$$(I^- = J^-) \wedge (I^- < J^+) \wedge (I^+ > J^-) \wedge (I^+ < J^+)$$

Le Tableau 14 résume les 13 relations d'Allen entre les deux intervalles temporels précis I et J.

Tableau 14. Algèbre des intervalles d'Allen.

Relation	Symbole	Inverse	Symbole	Relation entre les bornes des intervalles	Illustration
I Before J	B (I, J)	J After I	A (I, J)	$(I < J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ < J) \wedge (I^+ < J^+)$	
I Meets J	M (I, J)	J Met-by I	MI (I, J)	$(I < J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ = J) \wedge (I^+ < J^+)$	
I Overlaps J	O (I, J)	J Overlapped-by I	OI (I, J)	$(I < J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ > J) \wedge (I^+ < J^+)$	
I Starts J	S (I, J)	J Started-by I	SI (I, J)	$(I = J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ > J) \wedge (I^+ < J^+)$	
I During J	D (I, J)	J Contains I	DI (I, J)	$(I > J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ > J) \wedge (I^+ < J^+)$	
I Finishes J	F (I, J)	J Finished-by I	FI (I, J)	$(I > J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ > J) \wedge (I^+ = J^+)$	
I Equals J	EQ (I, J)	J Equals I	EQ (I, J)	$(I = J) \wedge (I < J^+) \wedge (I^+ > J) \wedge (I^+ = J^+)$	

Allen a fourni un ensemble d'axiomes décrivant la composition des 13 relations d'Allen et un algorithme permettant d'inférer de nouvelles relations temporelles. Par exemple :

$$\mathbf{I \text{ before } J \wedge J \text{ before } K \Rightarrow I \text{ before } K}$$

Selon [Gammoudi et al., 2017], les relations d'Allen souffrent de deux insuffisances majeures :

- **Manque de gradualité** : l'algèbre d'Allen ne distingue pas entre les relations qui appartiennent à une même classe. Il ne définit pas des relations temporelles de type « I est bien avant J » ou « I est juste avant J ». Cette situation est clairement illustrée par les deux relations d'Allen présentées dans la Figure 46 ;



Figure 46. Exemple montrant le manque de gradualité de l’algèbre d’Allen.

- **Manque de robustesse** : il signifie qu’une légère variation des bornes des intervalles change la relation. Cette situation est clairement illustrée par les trois relations d’Allen présentées dans la Figure 47.

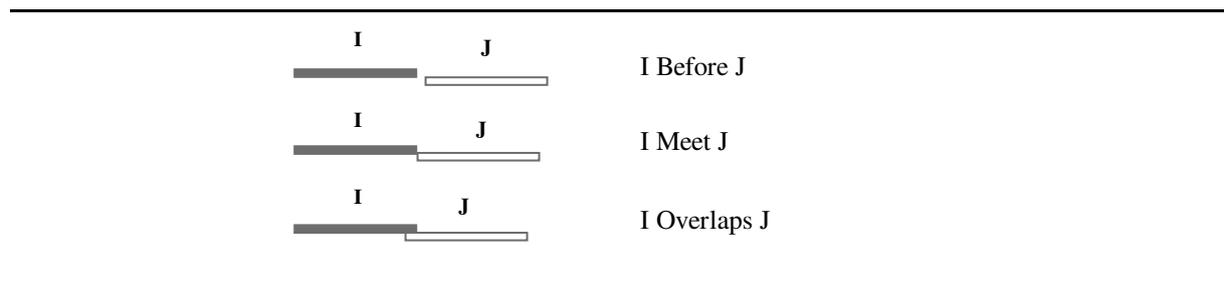


Figure 47 . Exemple montrant le manque de robustesse de l’algèbre d’Allen.

6.2.1.2. Algèbre des points de Vilain et Kautz

Le second modèle temporel qualitatif assez utilisé est celui introduit par Vilain et Kautz. Les entités temporelles considérées sont les points de la droite des réels (nous parlerons d’instant ou de dates). Trois relations temporelles qualitatives permettent de comparer deux instants T_1 et T_2 : T_1 Précède (Précède) T_2 , T_1 Suit (Suit) T_2 et T_1 est Same (Égale à) T_2 , comme le montre le Tableau 15.

Tableau 15. Algèbre des points de Vilain et Kautz.

Relation	Symbole	Inverse	Interprétation
T_1 Précède T_2	<	T_2 Suit T_1	
T_1 Suit T_2	>	T_2 Précède T_1	
T_1 Égale à T_2	=	T_2 Égale à T_1	

6.2.2. Modélisation de la dimension temporelle dans l'ontologie

À partir de la littérature, nous identifions cinq approches permettant la modélisation de la dimension temporelle dans l'ontologie : les logiques de description temporelles [Artale et Franconi, 2000], versioning [Klein et Fensel, 2001], réification [Noy et al., 2006], relations n-aires [Noy et Rector, 2006] et 4D-fluents [Welty et Fikes, 2006]. **Toutes ces approches représentent seulement les données temporelles précises (pas de prise en compte de celles imprécises).** Le Tableau 16 résume ces approches.

Les logiques de descriptions temporelles étendent les logiques de description du web sémantique classiques avec des constructeurs supplémentaires, par exemple : « dans le futur ». Elles offrent des capacités d'expressivité supplémentaires et restent décidables. Elles ne génèrent pas de redondance de données. Cependant, elles imposent d'étendre la sémantique et la syntaxe des langages du web sémantique pour ajouter la dimension temporelle aux données [Batsakis et al., 2017] [Herradi et al., 2017].

Le versioning consiste à créer une nouvelle version de l'ontologie à chaque fois qu'un objet change de valeur. Cette approche présente trois inconvénients majeurs : (1) le changement d'un simple attribut implique la création d'une nouvelle version de l'ontologie. Par la suite, elle présente un problème de la redondance des données [Harbelot et al., 2013] [Diallo, 2016] [Batsakis et al., 2017], (2) la recherche des données exige des recherches exhaustives dans plusieurs versions de l'ontologie [Batsakis et al., 2017] et (3) les relations temporelles entre les différentes versions ne sont pas clairement définies et les objets évolutifs ne sont pas spécifiés [Herradi et al., 2017].

La réification permet de décrire un triplet RDF et de lui associer un ensemble de métadonnées. Dans le contexte de la modélisation des données temporelles, cette approche permet d'introduire ces dernières sous forme d'arguments dans les prédicats décrivant la relation d'une entité avec son instant de validité ou intervalle. Cette approche présente deux limitations : (1) la redondance des données [Batsakis et al., 2011] [Harbelot et al., 2013] [Herradi et al., 2017] et (2) un problème de raisonnement [Batsakis et al., 2011] [Harbelot et al., 2013].

Les relations n-aires sont des relations qui lient un sujet à deux ou plusieurs termes. Cela est différent des relations binaires, qui lient un sujet à un seul terme. Cette approche présente un inconvénient dans le raisonnement, car la relation est scindée en deux [Diallo,

2016]. En outre, la modélisation des propriétés symétriques et inverses accentue le problème de la redondance des données [Noy, 2006] [Batsakis et al., 2011].

L'approche 4D-fluents est basée sur les perdurants et les endurants pour la représentation de l'évolution temporelle des données en OWL. Les objets temporels sont modélisés comme des objets à 4 dimensions (la quatrième dimension est le temps). Les propriétés qui ont une dimension temporelle sont appelées fluents. Les changements se produisent seulement sur la partie temporelle (la partie statique est inchangée). Elle permet le raisonnement [Batsakis et al., 2011] et elle maintient l'expressivité [Batsakis et al., 2011] [Sabri, 2013].

Tableau 16. Modélisation de la dimension temporelle dans l'ontologie.

	Données temporelles précises	Données temporelles imprécises	OWL/RDF	Inconvénients
Logiques de description temporelles	Oui	Non	OWL RDF	(+) Elles restent décidables ; (+) Elles ne génèrent pas des redondances de données ; (-) Elles imposent d'étendre la sémantique et la syntaxe des langages du web sémantique.
Versioning	Oui	Non		(-) Elle génère des redondances de données ; (-) La recherche d'une donnée exige des recherches exhaustives dans plusieurs versions de l'ontologie ; (-) Les relations temporelles entre les différentes versions ne sont pas clairement définies et les objets évolutifs ne sont pas spécifiés.
Réification	Oui	Non	RDF	(-) Elle présente un problème de raisonnement ; (-) Elle génère des redondances de données.
Relations n-aires	Oui	Non	RDF	(-) Elle présente un problème de raisonnement ; (-) Elle génère des redondances de données.
4D-fluents	Oui	Non	OWL	(+) Les changements se produisent seulement sur les parties temporelles ; (+) Elle permet le raisonnement ; (+) Elle maintient l'expressivité d'OWL.

Cet état de l'art nous permet de **choisir d'étendre l'approche 4D-fluents** pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations temporelles qualitatives qui peuvent exister entre ces derniers.

6.2.3. Extensions de l'algèbre d'Allen

Il existe un nombre important de travaux qui étendent l'algèbre d'Allen. Nous classifions ces derniers en travaux qui étendent l'algèbre des intervalles d'Allen pour comparer les intervalles temporels précis et ceux qui sont pour comparer les intervalles temporels imprécis.

Nous identifions trois approches qui étendent l'algèbre d'Allen pour comparer les intervalles temporels précis : [Guesgen et al., 1994], [Dubois et Prade 1989] et [Badaloni et Giacomini, 2006]. Guesgen et al. proposent des relations d'Allen floues vues comme des ensembles flous de relations d'Allen ordinaires en prenant en compte la notion de voisinage conceptuel introduite par [Freksa, 1992]. Dubois et Prade proposent une approche, basée sur la théorie des possibilités, pour comparer les intervalles temporels précis. Cette approche permet également de modéliser quelques relations temporelles graduelles comme « longtemps avant ». Badaloni et Giacomini développent une extension floue de l'algèbre d'Allen, appelée IA^{fuz} . Elle se base sur la théorie des possibilités pour associer un degré de préférence ($\in [0..1]$) à chaque relation atomique entre deux intervalles temporels classiques (par exemple : « la possibilité que I Meet J détient est 0,6 »).

Nous identifions quatre approches qui étendent l'algèbre d'Allen pour comparer les intervalles temporels imprécis : [Nagypál et Motik, 2003], [Ohlbach, 2004], [Schockaert et Cock, 2008] et [Gammoudi et al., 2017]. Nagypál et Motik définissent un modèle temporel basé sur les ensembles flous. Ils introduisent un ensemble d'opérateurs auxiliaires sur les intervalles (par exemple : un opérateur qui prend un intervalle I et construit l'intervalle contenant tous les instants qui précèdent l'instant initial de I). Puis, ils définissent des contreparties floues de ces opérateurs sur les intervalles temporels imprécis. La définition des relations d'Allen étendues est basée sur ces opérateurs flous. La plupart des relations résultantes perdent les propriétés de symétrie, de réflexivité et de transitivité qui caractérisent les relations d'Allen classiques (par exemple : la relation "Equals" n'est pas réflexive). Notons que la composition des relations résultantes n'est pas abordée par les auteurs. De plus, cette approche ne définit pas des relations temporelles graduelles. Le modèle d'Ohlbach permet de représenter quelques relations temporelles imprécises (par exemple : « I plus ou

moins termine J») en utilisant des mesures de chevauchement entre les ensembles flous. Cependant, ce travail ne prend pas en compte toutes les relations temporelles graduelles (par exemple : la relation temporelle « longtemps avant » n'est pas définie par l'auteur). En outre, la plupart des relations résultantes perdent les propriétés de symétrie, de réflexivité et de transitivité. Cette approche ne convient pas par la suite pour le raisonnement temporel. Schockaert et Cock proposent une généralisation des relations d'Allen aux intervalles temporels imprécis. Cette généralisation permet de traiter des relations classiques et des relations graduelles. Gammoudi et al. généralisent les relations d'Allen entre les intervalles temporels imprécis en proposant deux approches. Ces deux dernières ne définissent pas des relations temporelles graduelles.

Trois conclusions majeures peuvent être citées :

- **Absence de relations temporelles précises** : aucune approche, qui étend l'algèbre d'Allen pour comparer les intervalles temporels imprécis, ne définit des relations qualitatives précises. Toutes les relations résultantes sont floues (par la suite, elles ne peuvent pas être modélisées dans le cadre d'une ontologie précise) ;
- **Manque de gradualité** : seulement quelques approches définissent des relations temporelles graduelles : l'approche de Dubois et Prade, celle d'Ohlbach et celle de Schockaert et Cock. Cependant, elles se limitent à la définition de quelques relations graduelles sans donner la main à l'utilisateur de préciser le nombre de gradualités nécessaires à un contexte donné ;
- **Table de compositions** : la plupart des approches ne définissent pas une table de compositions, car la plupart des relations temporelles résultantes perdent les propriétés de symétrie, de réflexivité et de transitivité.

6.2.4. Notion d'ontologie floue

Une ontologie permet de concevoir le monde réel en ajoutant la dimension « sémantique ». Ce monde réel se caractérise par l'**imprécision**. Cependant, l'**ontologie précise ne peut pas modéliser l'imprécision** [Iglesias et Lehmann, 2011] [Yaguinuma et Reformat, 2013] [Rodríguez et al., 2014] [Djellal et Boufaïda, 2014].

6.2.4.1. Définition

L'ontologie floue est une **extension de l'ontologie précise** [Kaur et Kaur, 2012] [Zekri et al., 2015] [Akremi et al., 2016]. Elle se base sur l'intégration de la **logique floue** à la définition de l'ontologie précise pour représenter et raisonner sur les **données imprécises**

[Ghorbel H. et al., 2013] [Rodríguez et al., 2014]. Elle est très utile dans de nombreux domaines.

6.2.4.2. Composants

L'ontologie floue possède en plus des composants de l'ontologie précise, de nouveaux composants conformes à la logique floue, appelés les composants flous [Gruber, 2008].

D'après [Ghorbel H. et al., 2013], une ontologie floue a neuf composants : (1) les concepts précis, (2) les concepts flous, (3) les relations sémantiques précises, (4) les relations sémantiques floues, (5) les relations conceptuelles précises, (6) les relations conceptuelles floues, (7) les relations de fuzzification, (8) les axiomes et (9) les instances. Les composants précis gardent les mêmes définitions. Les composants flous sont définis en se basant sur la logique floue :

- **Un concept flou** est défini en se basant sur une variable linguistique relative à l'imprécision qui touche une de ses propriétés. La Figure 48 montre un exemple cité dans [Zekri et al., 2015]. Il montre trois concepts flous {Middle-Age-Patient, Old-Patient et Very-Old-Patient} dérivés du concept précis Patient ;

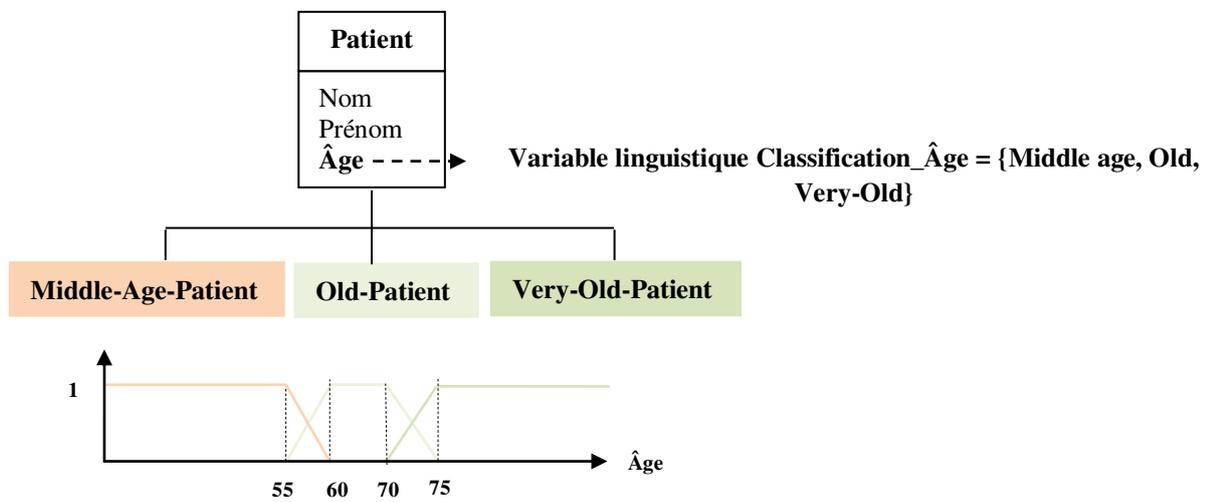


Figure 48. Fonctions d'appartenance des concepts flous relatifs au concept précis « Patient » [Zekri et al., 2015].

- **Une relation sémantique floue** est une relation sémantique binaire (entre deux concepts d'un domaine) pondérée. Par exemple, la relation sémantique de synonymie peut être forte, moyenne ou faible selon des poids définis par l'ontologiste ;
- **Une relation conceptuelle floue** est une relation binaire dont la sémantique est décrite par une valeur particulière d'une variable linguistique. La Figure 49 montre

trois relations conceptuelles floues : {Distance-courte, Distance-Moyenne et Distance-Longue} [Ghorbel H. et al., 2013] ;

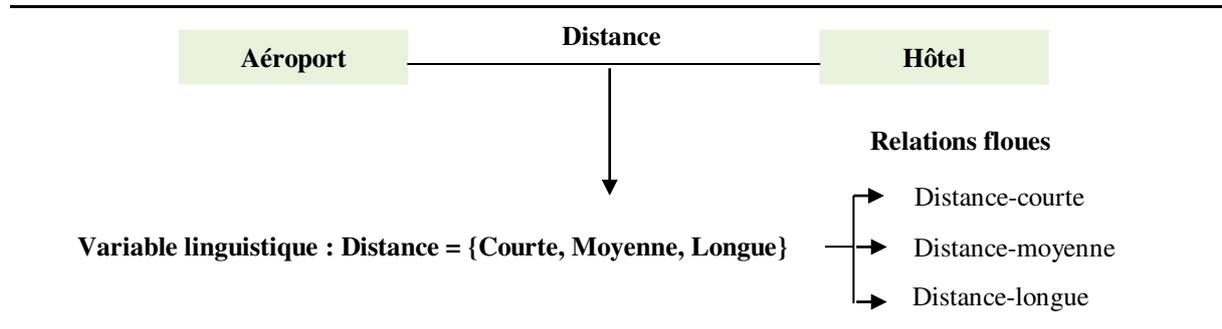


Figure 49. Exemple de relations conceptuelles floues [Ghorbel H. et al., 2013].

- **Une relation de fuzzification** est une relation d'héritage entre un concept précis et des concepts flous. Elle permet de transformer au moins une propriété sous forme d'une variable linguistique en précisant sa fonction d'appartenance et ses attributs. La Figure 48 montre une relation de fuzzification entre le concept précis Patient et les trois concepts flous {Middle-Age-Patient, Old-Patient et Very-Old-Patient}. Cette relation est obtenue en transformant la propriété Âge sous forme de la variable linguistique Classification-Âge ;
- Ghorbel H. et al. distinguent deux types d'**instances** : (1) les instances des concepts et des relations précis et (2) les instances des concepts et des relations flous ;
- **Les axiomes**, dans le cas d'une ontologie floue, servent aussi à exprimer les formules de calcul des fonctions d'appartenance. Nous proposons un exemple en nous basant sur l'exemple présenté dans la Figure 48 : un patient d'Alzheimer a 58 ans. Il est considéré comme « Middle-Age-Patient » avec un degré d'appartenance de 0,4. Ce score est calculé selon les formules de calcul de la fonction d'appartenance monotone décroissante suivante :

$$\text{Degré d'appartenance} = \begin{cases} 1 & \text{si } \hat{\text{âge}} < 55 \text{ ans} \\ (60 - \hat{\text{âge}}) / (5) & \text{si } \hat{\text{âge}} \in [55 \text{ ans}, 60 \text{ ans}] \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

6.2.4.3. Langages de description

Dans cette section, nous passons en revue quelques langages de description de l'ontologie floue : Fuzzy RDF [Mazzieri, 2004], FOWL [Gao et Liu, 2005], Fuzzy OWL 2 [Ghorbel H. et al, 2009], f-OWL [Stoilos et Stamou, 2010] et Fuzzy OWL 2 [Bobillo et Straccia, 2011]. Le Tableau 17 résume ces travaux.

Tableau 17. Langages de description de l'ontologie floue.

	Remarques	Extension du langage précis	Raisonnement associé	Plugin Protégé	Librairie Java associée	Représentation de l'ABox	Représentation du TBox
Fuzzy RDF	Il se base sur la réification : {(Sujet, Prédicat, Objet), N} ; avec N est le degré de confiance ($N \in [0, 1]$).	RDF		Non	Non	Non	Non
FOWL	Il est caractérisé par la balise « fdl » qui assure la déclaration des composants flous.	OWL		Non	Non	Oui	Non
Fuzzy OWL 2 de Ghorbel H et al.	Un framework de validation du code, appelé Fowl2-Validator, est proposé. Le plug-in est semi-automatique et n'est pas disponible publiquement.	OWL 2		Oui	Non	Non	Non
f-OWL	La logique de description floue associée est fuzzy-SHOIN δ D.	OWL		Non	Non	Oui	Non
Fuzzy OWL 2 de Bobillo et Straccia	La logique de description floue associée est SROIQ(D) flou. Une implémentation stable.	OWL 2	FuzzyDL DeLorean	Oui	Oui	Oui	Oui

Pour l'implémentation de notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue, **nous choisissons le langage de description de l'ontologie floue Fuzzy OWL 2.**

6.2.4.4. Raisonnement flou

À partir de la littérature, nous identifions les raisonneurs flous suivants : FuzzyJess [Orchard, 2001], FiRE³⁴ [Stoilos et al., 2006], FPLGERDS³⁵ [Habiballa, 2006], YADLR³⁶ [Konstantopoulos et Apostolikas, 2007], DeLorean³⁷ [Bobillo et al., 2007], ONTOSEARCH2 [Thomas et al., 2007], DLMedia³⁸ [Straccia et Visco, 2008], FuzzyDL³⁹ [Bobillo et Straccia, 2008], FuzzyRDF [Straccia, 2009], GURDL [Haarslev et al., 2009], FRESG [Wang et al., 2009], FuzzyDL-Learner [Lisi et Straccia, 2011], SMT-based solver⁴⁰ [Vidal et al., 2012] et Lighweight Fuzzy semantic Reasoner⁴¹ (LiFR) [Tsatsou et al., 2014]. Nous comparons ces raisonneurs en nous basant sur plusieurs critères. Le Tableau 18 récapitule cette étude.

³⁴ <http://www.image.ece.ntua.gr/~nsimou/FiRE/>

³⁵ http://irafm.osu.cz/en/c104_fplgerds

³⁶ <http://sourceforge.net/projects/yadlr>

³⁷ <http://webdiis.unizar.es/~fbobillo/delorean>

³⁸ <http://www.umbertostraccia.it/cs/software/DL-Media/DL-Media.html>

³⁹ <http://straccia.info/software/fuzzyDL/fuzzyDL.html>

⁴⁰ <http://arinf.udl.cat/fuzzydlsolver>

⁴¹ <http://mklab.itl.gr/project/lifr>

Tableau 18. Raisonneurs flous.

	Logique floue	Logique de description floue	Extension d'un autre raisonneur	Algorithme de raisonnement	Langage de programmation/ Implémentation	Open source	Disponibilité			Évaluation	GUI	Consistance de l'ABox	Implication	Récupération d'instances
							Application autonome	API Java	Protégé plugin					
Fire	Zadeh	SHIN flou		Tableau	Java	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
FPLGERDS	Lukasiewicz	ALL flou	GERDS	Resolution		Non	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non
YADLR	Zadeh, Lukasiewicz	ALCOQ flou		Resolution	Prolog	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non
DeLorean	Zadeh, Lukasiewicz	SROIQ flou	Pellet [Sirin et al., 2007]	Tableau	Java	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui
GURDL	Générale	ALL flou		Tableau	-	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Oui	Oui	Oui
FRESG	Zadeh	ALL flou	-	Tableau	-	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non
LiFR	Zadeh	f-DLP	KRHyper	Tableau	J2ME	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Oui
FuzzyDL Learner	Gödel	EL ++	KAON2	Tableau	Java	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
SMT-based solver	Gödel, Lukasiewicz, BL Product	ALL flou		-	web	Non	Oui	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
DLMedia	Zadeh, Gödel	DLR-Lite		-	-	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Non	Non	Non
Ontosearch2	Générale	DLLiteR	TrOWL	Tableau	-	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
FuzzyRDF	Générale	RDFS		-	Java	Oui	Oui	Non	Non	Non	Oui	Non	Non	Non
FuzzyDL	Zadeh, Lukasiewicz	SHIF flou		Tableau	Java, C++	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

La plupart des raisonneurs flous sont **obsolètes et non disponibles publiquement** [Iglesias et Lehmann, 2011]. FuzzyDL est implémenté en tant qu'application autonome, un plugin Protégé et une librairie Java. **FuzzyDL** est caractérisé par **une mise à jour permanente**. Son **installation est très facile**. Il est le raisonneur **le plus développé et le plus complet** [Iglesias et Lehmann, 2011].

Pour l'implémentation de notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue, **nous choisissons le raisonneur FuzzyDL**.

6.2.4.5. Méthodes de construction

Dans la littérature, il existe **très peu** de méthodes de construction de l'ontologie floue : **FOGA** (Fuzzy Ontology Generation FrAmework) [Quan et al., 2004], **FuzzyOntoMethodology** [Maâlej et al., 2010] et **FONTO** (Fuzzy for ONTOlogy) [Akremi et al., 2016].

FOGA est une méthode de construction de l'ontologie floue. Elle analyse les composants de l'ontologie floue déjà définis. Ensuite, elle procède à une structuration de ces derniers en appliquant la théorie des ensembles flous. Cette méthode n'a pas un modèle ontologique flou clair permettant la vérification de l'ontologie générée et elle ne permet pas l'extraction automatique des composants flous [Maâlej et al., 2010]. Selon [Akremi et al., 2016], « FOGA n'est pas une méthode standard pour encoder le flou dans l'ontologie ».

FuzzyOntoMethodology est une méthode de construction de l'ontologie floue. Elle extrait les concepts précis et flous à partir d'un corpus de données textuelles sémantiques floues. Le texte doit être en langue française. Les étapes de cette méthode sont inspirées de la méthodologie de conception d'ontologies précises METHODOLOGY [Corcho et al., 2003]. Elle est formée par les cinq étapes suivantes :

- 1- Constitution d'un corpus de données sémantiques floues ;
- 2- Traitement automatique du corpus de données sémantiques floues ;
- 3- Constitution de dictionnaires des concepts de l'ontologie floue ;
- 4- Constitution des relations d'héritage, de synonymie et d'antonymie de l'ontologie floue ;
- 5- Visualisation de la structure de l'ontologie floue.

Un framework semi-automatique, nommé Text2FuzzyOnto, est proposé pour opérationnaliser cette méthode. L'ontologie floue générée est codée en Fuzzy OWL 2. Une évaluation pour mesurer le degré d'automatisation de ce framework est présentée dans [Ghorbel H. et al., 2013]. Les résultats montrent que le pourcentage moyen de l'automatisation de composants corrects est environ 40%. La métrique F-Mesure est égale 54%.

FONTO est une méthode de fuzzification d'ontologies. Elle est composée de trois phases :

- 1- **Extraction des concepts flous** : l'objectif de cette étape est d'identifier les concepts flous, en exploitant la base lexicale WordNet. Les auteurs ne précisent pas les critères de sélection des concepts flous ;
- 2- **Détermination des classes floues** : les auteurs ne précisent pas les critères permettant l'automatisation de la détermination des classes floues. C'est l'ontologiste qui doit les préciser ;
- 3- **Calcul des degrés d'appartenance des classes identifiées** : l'ontologiste doit préciser les fonctions d'appartenance des classes identifiées à partir de la phase précédente.

FONTO permet seulement la fuzzification des classes. Elle ne permet pas la fuzzification des autres éléments de l'ontologie comme les propriétés. De plus, son processus n'est pas encore automatisé.

Par rapport à la méthode FONTO, FuzzyOntoMethodology permet aussi l'extraction des relations sémantiques floues (c'est-à-dire, les relations d'héritage, de synonymie et d'antonymie). Aucune de ces méthodes n'offre un outil qui permet l'automatisation à 100% de son processus. Les trois méthodes de construction d'ontologies floues ne supportent pas la fuzzification d'ontologies temporelles et/ou multilingues. Le Tableau 19 récapitule les méthodes de construction d'ontologies floues présentées.

Tableau 19. Méthodes de construction de l'ontologie floue.

	Document en entrée	Points négatifs	Automatisation du processus
FOGA	Composants de l'ontologie floue.	Pas d'extraction automatique des composants ontologiques flous ; Absence d'un mécanisme de correction de	Automatisé

		l'ontologie floue produite ; Ne supporte pas une entrée multilingue.	
FuzzyOntoMethodology	Corpus de données textuelles sémantiques floues en français.	Ne supporte pas une entrée multilingue, ne supporte que la langue française ;	Automatisé (l'outil Text2FuzzyOnto) ; F-Mesure est égale à 54%.
FONTO	Ontologie précise en langue anglaise.	Fuzzification des classes uniquement, pas de fuzzification des propriétés d'objets et des propriétés de type de données ; Absence d'un mécanisme de correction de l'ontologie floue produite ; Ne supporte pas une entrée multilingue, ne supporte que la langue anglaise ;	Non automatisé

6.3. Approche 1 : notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue précise

Dans cette section, nous présentons notre **première approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue précise**. Elle est entièrement basée sur un environnement précis. En effet, elle est proposée dans le cadre d'une **ontologie précise** et en utilisant un **raisonneur précis**. Premièrement, **nous étendons l'approche 4D-fluents** avec des nouveaux composants **précis** pour représenter les **intervalles temporels imprécis** et les **relations temporelles qualitatives précises** entre ces derniers. Deuxièmement, **nous étendons l'algèbre d'Allen pour comparer les intervalles temporels imprécis avec une vue précise**. Les relations temporelles qualitatives sont **précises**. Enfin, nous inférons, via un ensemble de **règles SWRL**, notre extension de l'algèbre d'Allen dans le contexte d'une ontologie précise formalisée en **OWL 2**.

Nous présentons chaque borne de l'intervalle temporel imprécis comme un **ensemble disjonctif ascendant**. Soit $I = [I^-, I^+]$ un intervalle temporel imprécis ($I^- < I^+$), avec $I^- = \{I^{-(1)} \dots I^{-(N)}\}$ et $I^+ = \{I^{+(1)} \dots I^{+(N)}\}$. Par exemple, si nous avons l'information suivante : « Alexandre a commencé ses études doctorales en 1975 et il a été diplômé vers la fin des années 70 ». L'intervalle de temps imprécis représentant cette période est $[1975, \{1977 \dots$

1980}]. Cela signifie que ses études de doctorat se terminent en 1977, ou 1978, ou 1979, ou 1980.

6.3.1. Notre extension de l'approche 4D-fluents

Nous étendons l'approche 4D-fluents classique dans le cadre d'une **ontologie précise** pour modéliser (1) des **intervalles temporels imprécis** et (2) des **relations temporelles qualitatives précises** entre ces derniers.

L'approche 4D-fluents classique permet de modéliser les intervalles temporels **précis**. Elle introduit deux classes précises "TimeSlice" et "TimeInterval" et quatre propriétés précises "tsTimeSliceOf", "tsTimeInterval", "hasBeginning" et "hasEnd". La classe "TimeSlice" est le domaine des entités qui représentent les entités temporelles. La propriété "tsTimeSliceOf" lie une instance de la classe "TimeSlice" à une entité temporelle. La propriété "tsTimeInterval" lie une instance de la classe "TimeSlice" à une instance de la classe "TimeInterval". Une instance de la classe "TimeInterval" est liée à deux instants qui spécifient le début et la fin de l'intervalle en utilisant, respectivement, les propriétés "hasBeginning" et "hasEnd". La Figure 50 illustre l'utilisation de l'approche 4D-fluents classique pour représenter l'exemple suivant : « Alexandre a commencé ses études doctorales en 1975 et il a été diplômé en 1978 ».

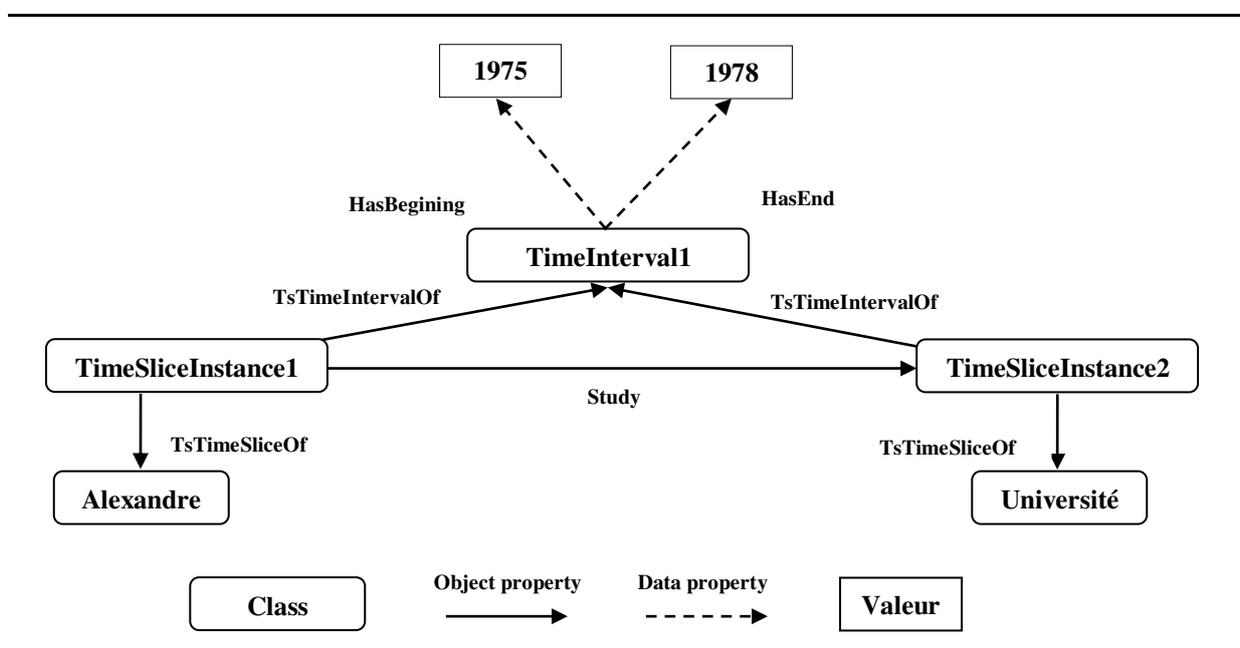


Figure 50. Une instanciation de l'approche 4D-fluents classique.

Nous étendons l'approche 4D-fluents pour représenter les intervalles temporels **imprécis** en ajoutant quatre propriétés de type de données précises : "HasBeginningFrom",

“HasBeginningTo”, “HasEndFrom” et “HasEndTo”. Le domaine de ces dernières est une instance de la classe “TimeInterval”. Le range de la propriété “HasBeginningFrom” est $I^{-(1)}$. Le range de la propriété “HasBeginningTo” est $I^{-(N)}$. Le range de la propriété “HasEndFrom” est $I^{+(1)}$. Le range de la propriété “HasEndTo” est $I^{+(N)}$.

Nous étendons l’approche 4D-fluents pour représenter **les relations temporelles qualitatives précises qui peuvent exister entre deux intervalles temporels imprécis**. Cela est implémenté en introduisant **une propriété d’objet précise**, appelée “RelationIntervals”. Cette propriété relie deux instances de la classe “TimeInterval”. La Figure 51 représente notre extension de l’approche 4D-fluents dans le cadre d’une ontologie précise.

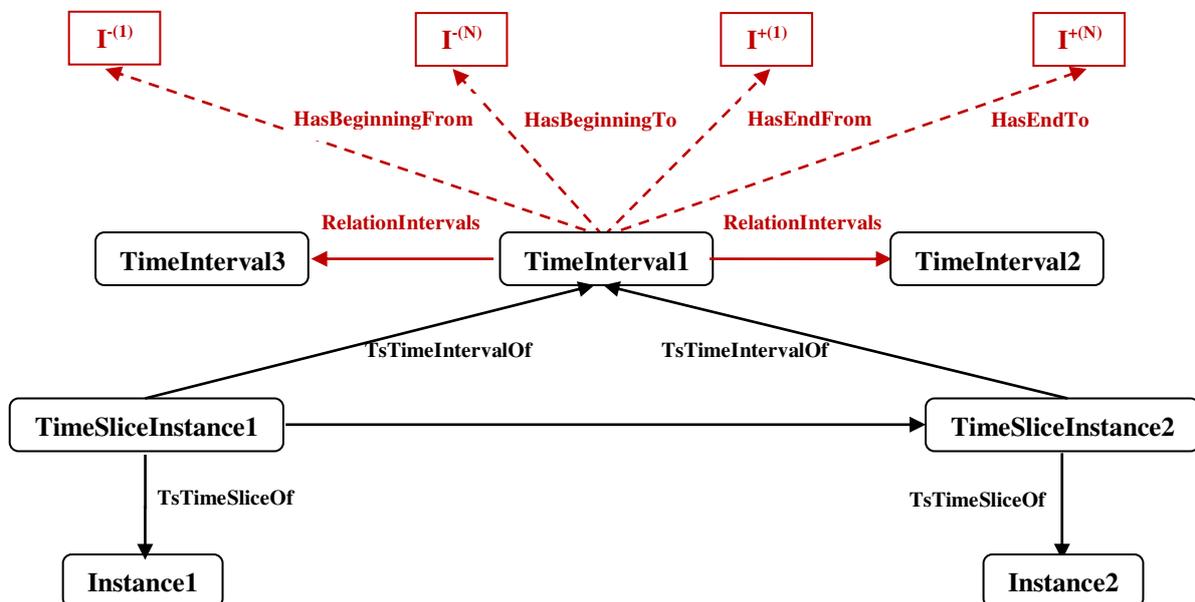


Figure 51. Notre extension de l’approche 4D-fluents dans le cadre d’une ontologie précise.

La Figure 52 montre une instanciation de notre extension de l’approche 4D-fluents. Nous considérons l’exemple suivant : « Alexandre s’est marié à Nicole juste après qu’il a eu son diplôme de doctorat. Alexandre a terminé ses études doctorales en 1980. Leur mariage dure 15 ans. Alexandre s’est remarié à Béatrice depuis environ 10 ans et ils ont divorcé en 2016 ». Soit $I = [I^-, I^+]$ et $J = [J^-, J^+]$ deux intervalles temporels imprécis qui représentent, respectivement, la durée du mariage d’Alexandre avec son ex-femme Nicole et celle qui est avec son ex-femme Béatrice. Supposons que $I^- = \{1980 \dots 1983\}$, $I^+ = \{1995 \dots 1998\}$, $J^- = \{2006 \dots 2008\}$ et $J^+ = 2016$.

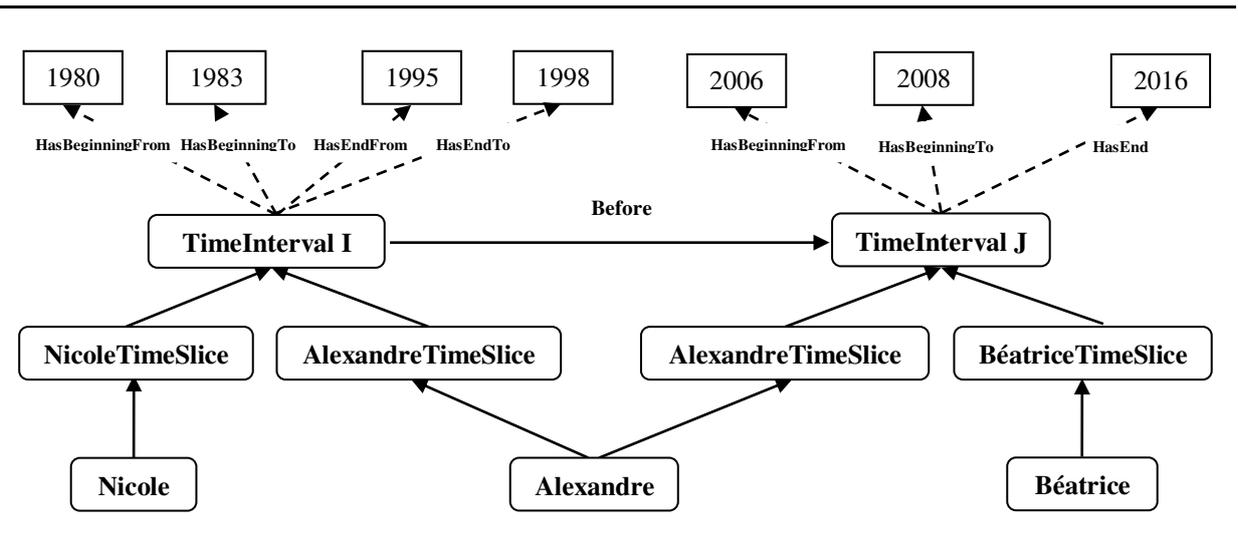


Figure 52. Une instantiation de notre extension de l’approche 4D-fluents dans le cadre d’une ontologie précise.

6.3.2. Notre extension de l’algèbre d’Allen

Notre but est de proposer des relations temporelles qualitatives précises qui peuvent exister entre deux intervalles temporels imprécis dans le contexte d’une ontologie précise.

Dans la littérature, les extensions de l’algèbre d’Allen pour comparer les intervalles temporels imprécis proposent seulement des relations floues. Cependant, ces dernières ne peuvent pas être modélisées dans le cadre d’une ontologie précise. Par conséquent, nous proposons **notre propre généralisation des relations d’Allen pour comparer deux intervalles temporels imprécis avec une vue précise, c’est-à-dire les relations résultantes sont précises.**

Soit $I = [I^-, I^+]$ et $J = [J^-, J^+]$ deux intervalles temporels imprécis ($I^- < I^+$ et $J^- < J^+$), avec $I^- = \{I^{-(1)} \dots I^{-(N)}\}$, $I^+ = \{I^{+(1)} \dots I^{+(N)}\}$, $J^- = \{J^{-(1)} \dots J^{-(N)}\}$ et $J^+ = \{J^{+(1)} \dots J^{+(N)}\}$. Nous proposons 13 relations temporelles qualitatives précises qui peuvent exister entre deux intervalles temporels imprécis. Par exemple, nous redéfinissons la relation temporelle d’Allen “Before (I, J)” entre deux intervalles temporels imprécis I et J comme suit :

$$\forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^- / (I^{+(i)} < J^{-(j)})$$

Nous suggérons exprimer cette relation en comparant le plus grand nombre de I^+ ($I^{+(N)}$) au plus petit nombre de J^- ($J^{-(1)}$) :

$$I^{+(N)} < J^{-(1)}$$

De la même manière, nous redéfinissons les autres relations d'Allen, comme le montre le Tableau 20. Nos relations temporelles résultantes conservent bien les propriétés de symétrie, de réflexivité et de transitivité des relations d'Allen classiques.

Tableau 20. Notre extension de l'algèbre d'Allen avec une vue précise.

Relation	Inverse	Interprétation	Relation entre les bornes des intervalles
Before (I, J)	After (I, J)	$\forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J / (I^{+(i)} < J^{(j)})$	$I^{+(N)} < J^{(1)}$
Meets (I, J)	Met-by (I, J)	$\forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J / (I^{+(i)} = J^{(j)})$	$(I^{+(1)} = J^{(1)}) \wedge (I^{+(N)} = J^{(N)})$
Overlaps (I, J)	Overlapped-by (I, J)	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} < J^{(j)}) \wedge (J^{(j)} < I^{+(i)}) \wedge (I^{+(i)} < J^{+(j)})$	$(I^{-(N)} < J^{(1)}) \wedge (J^{(N)} < I^{+(1)}) \wedge (I^{+(N)} < J^{+(1)})$
Starts (I, J)	Started-by (I, J)	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} = J^{(j)}) \wedge (I^{+(i)} < J^{+(j)})$	$(I^{-(1)} = J^{(1)}) \wedge (I^{-(N)} = J^{(N)}) \wedge (I^{+(N)} < J^{+(1)})$
During (I, J)	Contains (I, J)	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (J^{(j)} < I^{-(i)}) \wedge (I^{+(i)} < J^{+(j)})$	$(J^{(N)} < I^{-(1)}) \wedge (I^{+(N)} < J^{+(1)})$
Ends (I, J)	Ended-by (I, J)	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} < J^{(j)}) \wedge (I^{+(i)} = J^{+(j)})$	$(J^{(N)} < I^{-(1)}) \wedge (I^{+(1)} = J^{+(1)}) \wedge (I^{+(N)} = J^{+(N)})$
Equal (I, J)	Equal (I, J)	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{(j)} \in J, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} = J^{(j)}) \wedge (I^{+(i)} = J^{+(j)})$	$(I^{-(1)} = J^{(1)}) \wedge (I^{-(N)} = J^{(N)}) \wedge (I^{+(1)} = J^{+(1)}) \wedge (I^{+(N)} = J^{+(N)})$

Nous inférons, via un ensemble de **règles SWRL**, notre extension de l'algèbre d'Allen dans le contexte d'une ontologie **précise formalisée en OWL 2**. Ces relations sont représentées en se basant sur notre extension de l'approche 4D-fluent. Pour chaque relation temporelle qualitative, nous associons une règle SWRL. Par exemple, la règle SWRL permettant de déduire la relation temporelle "Meet (I, J)" est la suivante :

$$\text{TimeInterval (I)} \wedge \text{TimeInterval (J)} \wedge \text{HasEndFrom (I, a)} \wedge \text{HasBeginningFrom (J, b)} \wedge \text{Equals (a, b)} \wedge \text{HasEndTo (I, c)} \wedge \text{HasBeginningTo (J, d)} \wedge \text{Equals (c, d)} \rightarrow \text{Meet (I, J)}$$

6.4. Approche 2 : notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue

Dans cette section, nous présentons notre approche pour la **représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue (une ontologie et**

un raisonneur flous). Nous **étendons l'approche 4D-fluents** pour représenter les **intervalles temporels imprécis** et les **relations temporelles qualitatives imprécises** qui peuvent exister entre eux dans le contexte d'une ontologie floue. Pour raisonner sur les intervalles temporels imprécis, nous **étendons l'algèbre d'Allen** avec une **vue floue, graduelle et personnalisée**. Nous déduisons les relations résultantes dans le contexte d'une ontologie floue formalisée en **Fuzzy-OWL 2** en utilisant un ensemble de règles **IF-THEN de Mamdani**.

Soit $I = [I^-, I^+]$ un intervalle temporel imprécis. Nous représentons **la borne I^- comme un ensemble flou caractérisé par une fonction d'appartenance monotone croissante $U_{I^-}(x)$** avec $A = I^{-(1)}$ et $B = I^{-(N)}$. Nous représentons **la borne I^+ comme un ensemble flou caractérisé par une fonction d'appartenance monotone décroissante $U_{I^+}(x)$** avec $A = I^{+(1)}$ et $B = I^{+(N)}$.

$$\begin{aligned}
 U_{I^-}(x) &= \begin{cases} 0 & \text{IF } x < I^{-(1)} \\ (x - I^{-(1)}) / (I^{-(N)} - I^{-(1)}) & \text{IF } I^{-(1)} < x < I^{-(N)} \\ 1 & \text{IF } x \geq I^{-(N)} \end{cases} \\
 U_{I^+}(x) &= \begin{cases} 0 & \text{IF } x \leq I^{+(1)} \\ (-x + I^{+(N)}) / (I^{+(N)} - I^{+(1)}) & \text{IF } I^{+(1)} < x < I^{+(N)} \\ 0 & \text{IF } x \geq I^{+(N)} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Prenons l'exemple cité dans la section 6.3 : « Alexandre a commencé ses études doctorales en 1975 et il a été diplômé vers la fin des années 70 ». L'intervalle temporel qui correspond à cette période se caractérise par un début précis et une fin imprécise qui est représentée comme un ensemble flou caractérisé par une fonction d'appartenance monotone décroissante avec $A = 1977$ et $B = 1980$.

6.4.1. Notre extension de l'approche 4D-fluents

Nous **étendons l'approche 4D-fluents** dans le cadre d'une **ontologie floue** pour représenter (1) les **intervalles temporels imprécis** et (2) les **relations temporelles qualitatives floues** entre ces derniers.

Nous définissons deux **propriétés de type de données floues** "FuzzyHasBeginning" et "FuzzyHasEnd" à la classe "TimeInterval" pour représenter les intervalles temporels imprécis. La propriété "FuzzyHasBeginning" est caractérisée par une fonction d'appartenance

monotone croissante, avec $A = I^{-(1)}$ et $B = I^{-(N)}$. La propriété "FuzzyHasEnd" est caractérisée par une fonction d'appartenance monotone décroissante, avec $A = I^{+(1)}$ et $B = I^{+(N)}$.

Nous étendons l'approche 4D-fluents pour représenter les **relations temporelles qualitatives imprécises** qui peuvent exister entre deux intervalles temporels imprécis. Nous introduisons la **propriété d'objet floue** "FuzzyRelationIntervals" pour représenter ces relations. Cette propriété lie deux instances de la classe floue "TimeInterval". "FuzzyRelationIntervals" se caractérise par une fonction d'appartenance monotone croissante, avec $A = 0$ et $B = 1$. La Figure 53 représente notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre de l'ontologie floue.

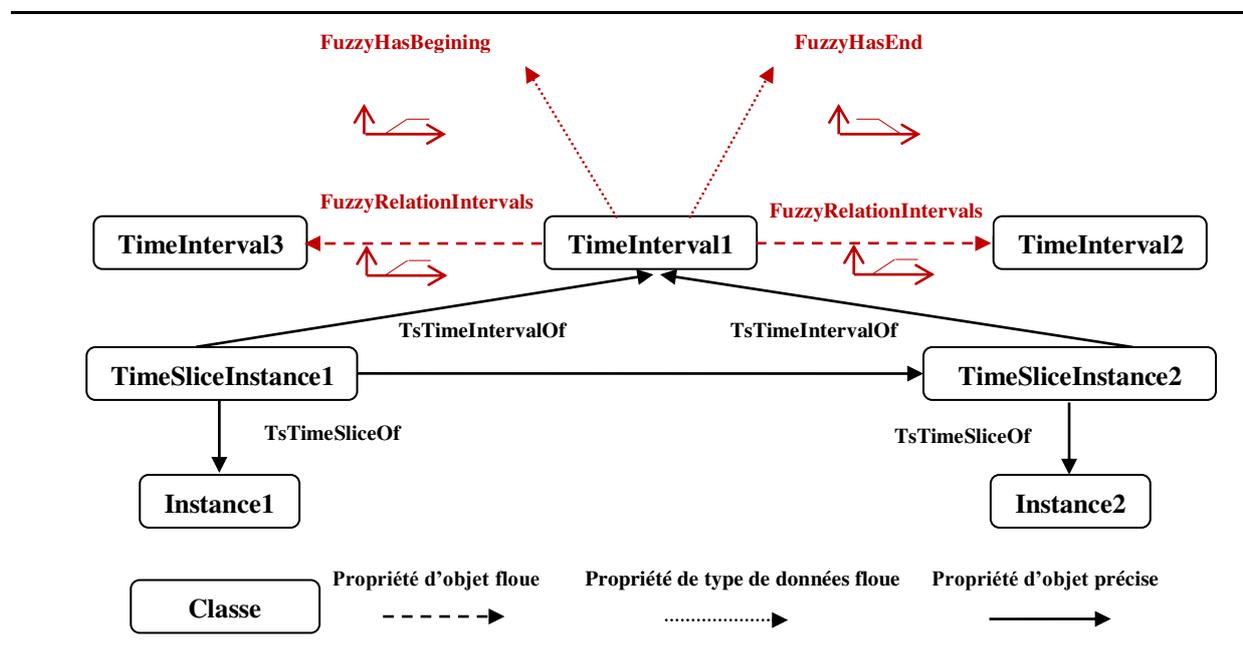


Figure 53. Notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie floue.

La Figure 54 montre une instanciation de notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie floue. Nous considérons cet exemple : « La seconde guerre mondiale dure de la fin des années 30 au septembre 1945. La guerre froide s'installe progressivement à partir de la fin de la seconde guerre mondiale dans les années 1945 à 1947 et dure jusqu'à la fin des années 80. ». Soit $I = [I^-, I^+]$ et $J = [J^-, J^+]$ deux intervalles temporels imprécis représentant, respectivement, la durée de la seconde guerre mondiale et la guerre froide. I^- est représenté par la propriété de type de données floue "FuzzyHasBeginning" qui se caractérise par une fonction d'appartenance monotone croissante avec $A=1937$ et $B=1940$. I^+ est représenté par la propriété de type de données précise "HasEnd" ayant la valeur « 1945 ». J^- est représenté par la propriété de type de données floue "FuzzyHasBeginning" qui se

caractérisé par une fonction d'appartenance monotone croissante avec $A=1945$ et $B=1947$. J^+ est représenté par la propriété de type de données floue "FuzzyHasEnd" qui se caractérise par une fonction d'appartenance monotone décroissante avec $A=1987$ et $B=1990$.

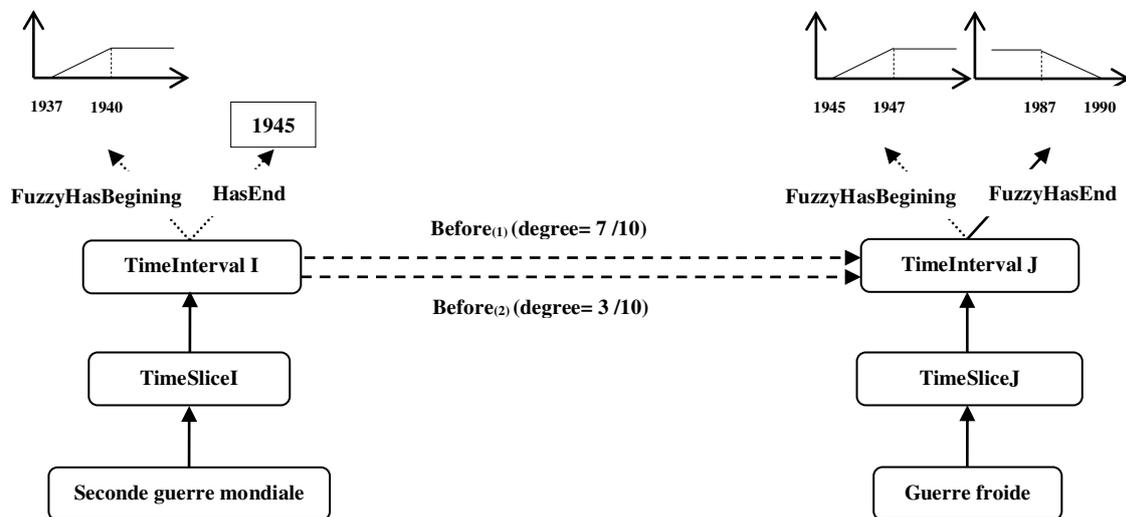


Figure 54. Une instantiation de notre extension de l'approche 4D-fluents dans le cadre d'une ontologie floue.

6.4.2. Raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue, graduelle et personnalisée

Dans cette section, nous présentons notre **extension de l'algèbre des points de Vilain et Kautz** en proposant un ensemble de comparateurs **flous, graduels et personnalisés**. En nous basant sur ces derniers, nous **étendons l'algèbre d'Allen** pour comparer deux intervalles temporels imprécis. Les relations résultantes sont aussi **floues, graduelles et personnalisées**.

6.4.2.1. Notre extension de l'algèbre de Vilain et Kautz

Nous généralisons les comparateurs temporels qualitatifs précis "Precede", "Follow" et "Same" proposés par Vilain et Kautz avec une **vue floue, graduelle et personnalisée**. (1) Nos comparateurs sont **flous**, car ils sont basés sur la théorie des ensembles flous. (2) Ils sont **graduels**, car nous proposons des comparateurs temporels de types « juste avant », « long après », etc. Ces comparateurs sont minutieux. Par exemple, l'affirmation « Roosevelt est décédé juste avant le début de la guerre froide » est plus minutieuse relativement à l'affirmation « Roosevelt est décédé avant le début de la guerre froide ». (3) Ils sont **personnalisés**. Notre extension ne se limite pas à un nombre donné de comparateurs. Pour

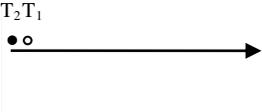
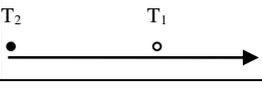
chaque comparateur de Vilain et Kautz classique, nous associons N nouveaux comparateurs temporels. N représente le nombre de gradualités et il est défini par l'utilisateur.

Soit α et β deux entiers positifs, T_1 et T_2 deux instants temporels et le nombre de gradualités N (α, β, T_1, T_2 et $N \in]0, +\infty [$). Nous définissons dans les sections qui suivent notre extension des comparateurs de Vilain et Kautz.

6.4.2.1.1. Notre généralisation du comparateur "Follows"

Nous définissons des comparateurs temporels qualitatifs entre T_1 et T_2 $\{\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$. Ces derniers sont une généralisation du comparateur temporel précis "Follows" de Vilain et Kautz. $\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ signifie que T_1 est juste après ou à peu près en même temps que T_2 w.r.t. (α, β) . Graduellement, le décalage de temps entre T_1 et T_2 augmente jusqu'à $\text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ qui signifie que T_1 est longtemps après par rapport à T_2 w.r.t. (α, β) . Leurs significations sont illustrées dans le Tableau 21.

Tableau 21. Signification des comparateurs temporels $\{\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$.

Relation	Signification	Définition	Illustration
$\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Juste après ou à peu près en même temps w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$0 < T_1 - T_2 < \alpha + \beta$	
$\text{Follow}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Juste après w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Precede}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$\alpha < T_1 - T_2 < 2\alpha + 2\beta$	
...			
$\text{Follow}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Moyen après w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Precede}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$(K - 1)\alpha + (K - 2)\beta < T_1 - T_2 < K\alpha + K\beta$	
...			
$\text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Longtemps après w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$T_1 - T_2 > (N - 1)\alpha + (N - 2)\beta$	

Les comparateurs $\{\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$ sont définis comme des ensembles flous. L'ensemble flou associé à $\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ est caractérisé par une fonction d'appartenance monotone décroissante, avec $A = \alpha$ et $B = [\alpha + \beta]$.

$$\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} 1 & \text{IF } T_1 - T_2 \leq \alpha \\ (T_2 - T_1 + \alpha + \beta) / (\beta) & \text{IF } \alpha < T_1 - T_2 < \alpha + \beta \\ 0 & \text{IF } T_1 - T_2 \geq \alpha + \beta \end{cases}$$

Les comparateurs $\text{Follow}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ ($K \in [2, N-1]$) sont représentés par des ensembles flous qui se caractérisent par une fonction d'appartenance trapézoïdale, avec $A = [(K-1)\alpha]$, $B = [(K-1)\alpha + (K-1)\beta]$, $C = [K\alpha + (K-1)\beta]$ et $D = [K\alpha + K\beta]$.

$$\text{Follow}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} ((T_1 - T_2) - (K-1)\alpha) / ((K-1)\beta) \underline{\text{IF}} (K-1)\alpha \leq T_1 - T_2 < (K-1)\alpha + (K-1)\beta \\ 1 \underline{\text{IF}} (K-1)\alpha + (K-1)\beta \leq T_1 - T_2 \leq K\alpha + (K-1)\beta \\ (-(T_1 - T_2) + K\alpha + K\beta) / (\beta) \underline{\text{IF}} K\alpha + (K-1)\beta < T_1 - T_2 \leq K\alpha + K\beta \\ 0 \text{ Si non} \end{cases}$$

Le comparateur $\text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ est représenté par un ensemble flou qui se caractérise par une fonction d'appartenance monotone croissante avec $A = [(N-1)\alpha + (N-1)\beta]$ et $B = [(N-1)\alpha + (N-1)\beta]$.

$$\text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} 0 \underline{\text{IF}} T_1 - T_2 \leq (N-1)\alpha + (N-2)\beta \\ ((T_1 - T_2) - (N-1)\alpha + (N-2)\beta) / (2N + (N-3)\beta) \underline{\text{IF}} (N-1)\alpha + (N-2)\beta < T_1 - T_2 < (N-1)\alpha + (N-1)\beta \\ 1 \underline{\text{IF}} T_1 - T_2 \geq (N-1)\alpha + (N-1)\beta \end{cases}$$

La Figure 55 représente les fonctions d'appartenance des ensembles flous associées aux comparateurs $\{\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$.

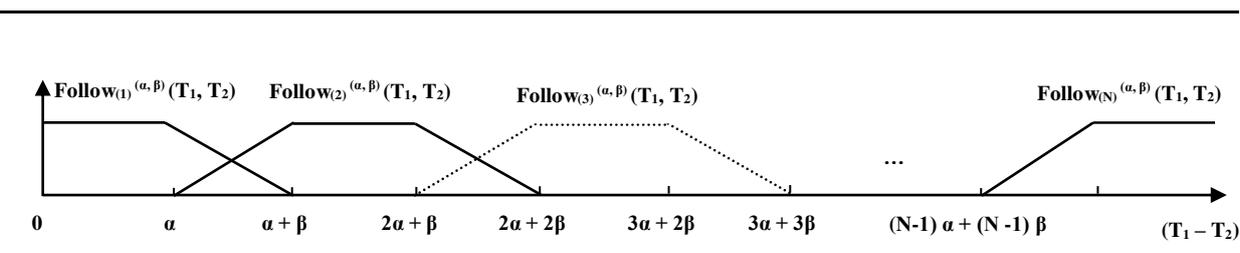


Figure 55. Fonctions d'appartenance associées aux comparateurs $\{\text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$.

Chaque comparateur temporel $\text{Follow}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ ($I \in [1, N]$) est défini par :

$$\text{Follow}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$$

Le comparateur temporel qualitatif de Vilain et Kautz $\text{Follow}(T_1, T_2)$ est défini par :

$$\text{Follow}(T_1, T_2) = \sum \text{Follow}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \quad (I \in [1, N])$$

6.4.2.1.2. Notre généralisation du comparateur "Precede"

Nous généralisons le comparateur temporel précis "Precede" de Vilain et Kautz, avec une **vue floue, graduelle et personnalisée**. Nous définissons des comparateurs temporels qualitatifs entre deux instants temporels T_1 et T_2 $\{\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$. $\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ signifie que T_1 est juste avant ou à peu près en même temps que T_2 w.r.t. (α, β) . Graduellement, le décalage de temps entre T_1 et T_2 augmente jusqu'à $\text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ qui signifie T_1 est longtemps avant par rapport à T_2 w.r.t. (α, β) . Leurs significations sont illustrées dans le Tableau 22.

Tableau 22. Signification des comparateurs temporels $\{\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$.

Relation	Signification	Définition	Illustration
$\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Juste avant ou à peu près en même temps w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Follow}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$-\alpha - \beta < T_1 - T_2 < 0$	
$\text{Precede}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Juste avant w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Follow}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$-2\alpha - 2\beta < T_1 - T_2 < -\alpha$	
...			
$\text{Precede}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Moyen avant w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Follow}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$-K\alpha - K\beta < T_1 - T_2 < -(K-1)\alpha - (K-2)\beta$	
...			
$\text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$	Longtemps avant w.r.t. $(\alpha, \beta) = \text{Follow}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1)$	$T_1 - T_2 < -(N-1)\alpha - (N-2)\beta$	

Chaque comparateur $\text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ ($I \in [1, N]$) est défini comme un ensemble flou. L'ensemble flou associé au comparateur $\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ est caractérisé par une fonction d'appartenance monotone croissante, avec $A = [-\alpha - \beta]$ et $B = [-\alpha]$.

$$\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} 0 & \text{IF } T_1 - T_2 < -\alpha - \beta \\ (T_1 - T_2 + \alpha + \beta) / \beta & \text{IF } -\alpha - \beta < T_1 - T_2 < -\alpha \\ 1 & \text{IF } T_1 - T_2 \geq -\alpha \end{cases}$$

Chaque comparateur de $\text{Precede}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ ($K \in [2, N-1]$) est représenté par un ensemble flou qui se caractérise par une fonction d'appartenance trapézoïdale, avec $A = [-N\alpha - N\beta]$, $B = [-N\alpha - (N-1)\beta]$, $C = [-(N-1)\alpha - (N-1)\beta]$ et $D = [-(N-1)\alpha - (N-2)\beta]$.

$$\text{Precede}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} (T_1 - T_2 + K(\alpha + \beta)) / (\beta) & \text{IF } -K\alpha - K\beta \leq T_1 - T_2 < -K\alpha - (K-1)\beta \\ 1 & \text{IF } -K\alpha - (K-1)\beta \leq T_1 - T_2 \leq -(K-1)\alpha - (K-1)\beta \\ (- (T_1 - T_2) - (K-1)\alpha - (K-2)\beta) / \beta & \text{IF } -(K-1)\alpha - (K-1)\beta < T_1 - T_2 \leq -(K-1)\alpha - (K-2)\beta \\ 0 & \text{Si non} \end{cases}$$

Le comparateur $\text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ est représenté par un ensemble flou qui se caractérise par une fonction d'appartenance monotone décroissante, avec $A = [-(N-1)\alpha - (N-1)\beta]$ et $B = [-(N-1)\alpha - (N-2)\beta]$.

$$\text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} 1 & \text{IF } T_1 - T_2 < -(N-1)\alpha - (N-1)\beta \\ (- (T_1 - T_2) - (N-1)\alpha - (N-2)\beta) / \beta & \text{IF } -(N-1)\alpha - (N-1)\beta < T_1 - T_2 < -(N-1)\alpha - (N-2)\beta \\ 0 & \text{IF } T_1 - T_2 \geq -(N-1)\alpha - (N-2)\beta \end{cases}$$

La Figure 56 représente les fonctions d'appartenance associées aux comparateurs $\{\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$.

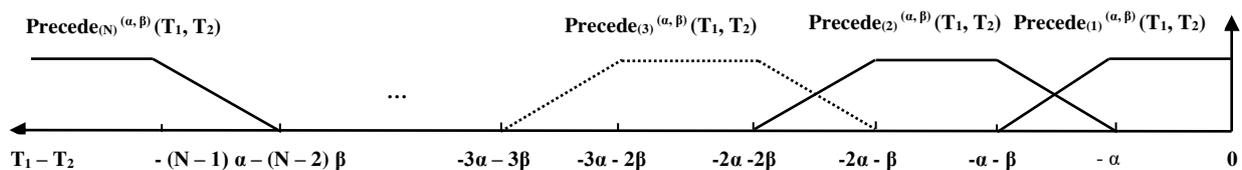


Figure 56. Fonctions d'appartenance associées aux comparateurs $\{\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \dots \text{Precede}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)\}$.

Chaque comparateur temporel qualitatif entre deux instants temporels T_1 et T_2 $\text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ ($I \in [1, N]$) est défini par :

$$\text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = 1 - \text{Follow}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \quad (I \in [1, N])$$

Chaque comparateur temporel $\text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ est défini aussi par :

$$\text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \text{Follow}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1) \quad (I \in [1, N])$$

Le comparateur temporel qualitatif de Vilain et Kautz Precede (T_1, T_2) est défini par :

$$\text{Precede}(T_1, T_2) = \sum \text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) \quad (I \in [1, N])$$

6.4.2.1.3. Notre généralisation du comparateur "Same"

Nous définissons le comparateur temporel qualitatif entre deux instants temporels T_1 et T_2 $\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$. Ce comparateur est une généralisation du comparateur temporel précis "Same" de Vilain et Kautz. Il signifie que T_1 est à peu près en même temps que T_2 w.r.t. (α, β) . Il est défini comme un ensemble flou caractérisé par une fonction d'appartenance trapézoïdale, avec $A = [-\alpha - \beta]$, $B = [-\alpha]$, $C = [\alpha]$ et $D = [\alpha + \beta]$.

$$\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \begin{cases} (T_1 - T_2 + \alpha + \beta) / \beta \quad \text{IF } -\alpha - \beta \leq T_1 - T_2 < -\alpha \\ 1 \quad \text{IF } -\alpha \leq T_1 - T_2 \leq \alpha \\ (T_2 - T_1 - \alpha - \beta) / (-2\alpha - \beta) \quad \text{IF } \alpha < T_1 - T_2 \leq (\alpha + \beta) \\ 0 \quad \text{Si non} \end{cases}$$

La Figure 57 montre la fonction d'appartenance associée au comparateur $\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$.

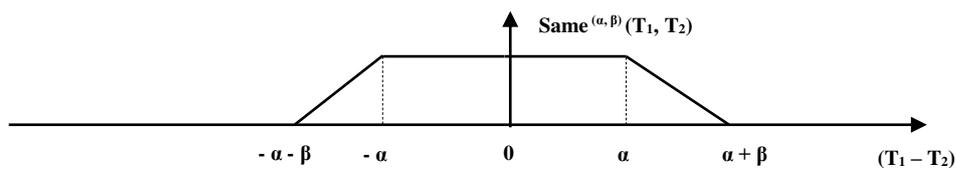


Figure 57. Fonction d'appartenance associée au comparateur $\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$.

Le comparateur temporel qualitatif $\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2)$ est défini par :

$$\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = \text{Min}(\text{Follow}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2), \text{Precede}_{(I)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2))$$

Exemple: Soit T_1 et T_2 deux instants temporels qui représentent respectivement 1974 et 2017. En utilisant $N = 3$, $\alpha = 10$ ans et $\beta = 20$ ans, nous obtenons :

$\text{Follow}_{(1)}^{(10,20)}(T_1, T_2) = 0$	$\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = 0$	$\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = 0$
$\text{Follow}_{(2)}^{(10,20)}(T_1, T_2) = 0$	$\text{Precede}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = 17/20$	
$\text{Follow}_{(3)}^{(10,20)}(T_1, T_2) = 0$	$\text{Precede}_{(3)}^{(\alpha, \beta)}(T_1, T_2) = 3/20$	
$\text{Follow}_{(1)}^{(10,20)}(T_2, T_1) = 0$	$\text{Precede}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1) = 0$	$\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1) = 0$
$\text{Follow}_{(2)}^{(10,20)}(T_2, T_1) = 17/20$	$\text{Precede}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1) = 0$	
$\text{Follow}_{(3)}^{(10,20)}(T_2, T_1) = 3/20$	$\text{Precede}_{(3)}^{(\alpha, \beta)}(T_2, T_1) = 0$	

6.4.2.2. Notre extension de l'algèbre d'Allen

Nous étendons l'algèbre d'Allen pour comparer les intervalles temporels imprécis avec une vue floue, graduelle et personnalisée. (1) Nos relations sont **floues**, car elles sont basées sur la théorie des ensembles flous. Leurs définitions sont basées sur nos compacteurs flous, définis dans la section précédente. (2) Elles sont temporelles sont **graduelles**, c'est-à-dire nous prenons en compte les relations temporelles de types « juste avant », « long après », etc. (3) Elles sont **personnalisées**. Par rapport aux travaux connexes, notre travail ne se limite pas à un nombre donné de relations. Pour chaque relation d'Allen, N nouvelles relations temporelles sont associées. Il est possible de déterminer le niveau de précision qui doit être imposé dans un contexte donné. Par exemple, la relation classique d'Allen "Before" peut-être généralisée en N relations temporelles pour comparer deux intervalles temporels imprécis I et J : $\{\text{Before}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I, J), \dots, \text{Before}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)\}$. $\text{Before}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$ signifie que I est juste avant ou à peu près en même temps que J w.r.t. (α, β) . Graduellement, le décalage de temps entre I et J augmente jusqu'à $\text{Before}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$ qui signifie que I est longtemps avant par rapport à J w.r.t. (α, β) . Leurs significations sont illustrées dans le Tableau 23.

Tableau 23. Signification des relations temporelles $\{\text{Before}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I, J), \dots, \text{Before}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)\}$.

Relation	Signification	Illustration
$\text{Before}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	Juste avant ou à peu près en même temps w.r.t. (α, β)	
$\text{Before}_{(2)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	Juste avant w.r.t. (α, β)	
...		
$\text{Before}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	Moyen avant w.r.t. (α, β)	
...		
$\text{Before}_{(N)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	Longtemps avant w.r.t. (α, β)	

Par exemple, la relation temporelle floue, graduelle et personnalisée $\text{Before}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$ est définie par :

$$\forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^- / \text{Proceed}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(i)}, J^{-(j)})$$

Cela signifie que l'instant le plus récent de I^+ ($I^{+(N)}$) doit précéder l'instant le plus ancien de J^- ($J^{-(1)}$) :

$$\text{Proceed}_{(1)}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{-(1)})$$

De la même manière, nous définissons les autres relations temporelles floues, graduelles et personnalisées, comme le montre le Tableau 24.

Tableau 24. Notre extension de l'algèbre d'Allen avec une vue floue, graduelle et personnalisée.

Relation	Inverse	Relations entre les bornes des intervalles	Définition
$\text{Before}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{After}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^- / (I^{+(i)} < J^{-(j)})$	$\text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{-(1)})$
$\text{Meets}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{Met-by}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^- / (I^{+(i)} = J^{-(j)})$	$\text{Min}(\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(1)}, J^{-(1)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{-(N)}))$
$\text{Overlaps}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{Overlapped-by}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^-, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} < J^{-(j)} \wedge (J^{-(j)} < I^{+(i)} \wedge (I^{+(i)} < J^{+(j)}))$	$\text{Min}(\text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I^{-(N)}, J^{-(1)}) \wedge \text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(J^{-(N)}, I^{+(1)}) \wedge \text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{+(1)}))$
$\text{Starts}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{Started-by}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^-, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} = J^{-(j)} \wedge (I^{+(i)} < J^{+(j)}))$	$\text{Min}(\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{-(1)}, J^{-(1)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{-(N)}, J^{-(N)}) \wedge \text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{+(1)}))$
$\text{During}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{Contains}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^-, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (J^{-(j)} < I^{-(i)} \wedge (I^{+(i)} < J^{+(j)}))$	$\text{Min}(\text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(J^{-(N)}, I^{-(1)}) \wedge \text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{+(1)}))$
$\text{Ends}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{Ended-by}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^-, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} < J^{-(j)} \wedge (I^{+(i)} = J^{+(j)}))$	$\text{Min}(\text{Proceed}_{(K)}^{(\alpha, \beta)}(J^{-(N)}, I^{-(1)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(1)}, J^{+(1)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{+(N)}))$
$\text{Equal}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\text{Equal}^{(\alpha, \beta)}(I, J)$	$\forall I^{-(i)} \in I^-, \forall I^{+(i)} \in I^+, \forall J^{-(j)} \in J^-, \forall J^{+(j)} \in J^+ / (I^{-(i)} = J^{-(j)} \wedge (I^{+(i)} = J^{+(j)}))$	$\text{Min}(\text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{-(1)}, J^{-(1)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{-(N)}, J^{-(N)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(1)}, J^{+(1)}) \wedge \text{Same}^{(\alpha, \beta)}(I^{+(N)}, J^{+(N)}))$

Nos relations temporelles conservent bien les propriétés de symétrie, de réflexivité et de transitivité des relations classiques d'Allen.

Nous implémentons les relations résultantes dans le contexte d'une **ontologie floue formalisée en Fuzzy-OWL 2**. Nous utilisons l'éditeur d'ontologie PROTEGE version 4.3 et le raisonneur flou FuzzyDL. Nous proposons un ensemble de règles **IF-THEN de Mamdani** permettant de déduire les relations temporelles floues présentées dans le Tableau 24 et qui sont représentables en se basant sur notre extension de l'approche 4D-fluents. Par exemple, la règle IF-THEN de Mamdani qui permet de déduire la relation temporelle "Overlaps₍₁₎^(α, β) (I, J)" est la suivante :

```
(define-concrete-feature Proceed(1/1) real)
(define-concrete-feature Proceed(1/2) real)
(define-concrete-feature Proceed(1/3) real)
(define-concrete-feature Overlaps(1) real)
(define-fuzzy-concept Fulfilled Right-shoulder(0,- $\alpha$ - $\beta$ ,- $\alpha$ ,0))
(define-fuzzy-concept True Right-shoulder(0,0,1,1) )
(define-concept Rule0 (g-and (some Proceed(1/1) Fulfilled) (some Proceed(1/2) Fulfilled) Fulfilled) (some Proceed(1/3) Fulfilled) (some Overlaps(1) True)) // La règle floue IF-THEN de Mamdani
(instance facts (=Proceed(1/1) (I(N) - J(1))))
(instance facts (=Proceed(1/2) (J(N) - I(1))))
(instance facts (=Proceed(1/3) (I(N) - J(1))))
```

Dans cet exemple, nous définissons trois variables d'entrée floues, nommées "Proceed_(1/1)", "Proceed_(1/2)" et "Proceed_(1/3)", qui ont la même fonction d'appartenance que celle de "Proceed₍₁₎^(α, β)". Nous définissons une variable de sortie floue "Overlaps₍₁₎" qui a la même fonction d'appartenance que celle de la propriété d'objet floue "FuzzyRelationIntervals". Nousinstancions "Proceed_(1/1)", "Proceed_(1/2)" et "Proceed_(1/3)" respectivement avec (I^(N) - J⁽¹⁾), (J^(N) - I⁽¹⁾) et (I^(N) - J⁽¹⁾).

6.5. Conclusion

L'utilisateur de CAPTAIN MEMO peut saisir les données temporelles d'une façon imprécise. Ces dernières doivent être prises en compte par notre ontologie MemoFuzzyOnto. L'état de l'art montre qu'il existe plusieurs approches permettant la modélisation et le raisonnement sur les données temporelles dans l'ontologie, cependant, à notre connaissance,

ces travaux traitent seulement les données temporelles précises (pas de prise en compte des données temporelles imprécises).

C'est pourquoi dans cette thèse, nous proposons deux approches pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de l'ontologie. (1) Notre première approche est basée sur un environnement totalement précis (une ontologie précise et un raisonneur précis). Nous étendons l'approche 4D-fluents pour modéliser les intervalles temporels imprécis et les relations temporelles qualitatives précises entre ces derniers dans le cadre de OWL 2. Pour raisonner sur les intervalles temporels imprécis, nous étendons l'algèbre des intervalles d'Allen avec une vue précise. Les inférences sont effectuées en utilisant des règles SWRL. (2) Notre deuxième approche est basée sur un environnement totalement flou (une ontologie floue et un raisonneur flou). Nous étendons l'approche 4D-fluents pour représenter ces intervalles et les relations temporelles qualitatives imprécises qui peuvent exister entre eux dans le cadre de Fuzzy-OWL 2. Nous étendons l'algèbre d'Allen avec une vue graduelle, personnalisée et floue pour raisonner sur les intervalles temporels imprécis. Nous déduisons les relations résultantes via un ensemble de règles IF-THEN de Mamdani.

Concernant le choix entre nos deux approches (notre approche précise et notre approche floue), comme l'ontologie floue est une extension de l'ontologie précise, les chercheurs peuvent choisir l'une des deux approches pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de leurs ontologies précises ou floues. Cependant, par rapport à l'approche avec une vue précise, l'approche floue propose et raisonne sur des relations temporelles qualitatives graduelles et personnalisées comme « juste avant » ou « juste après ». Par la suite, dans le cadre de la manipulation des ontologies floues, nous encourageons les chercheurs à choisir notre approche avec une vue floue. L'intérêt majeur de notre approche avec une vue précise est que les chercheurs qui manipulent une ontologie précise ne sont pas obligés à apprendre les concepts relatifs à l'ontologie floue pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels imprécis. Notons que les outils de manipulation de l'ontologie précise sont plus matures et supportent mieux le passage à l'échelle. Notre approche avec une vue précise est plus appropriée pour les outils commercialisés.

Dans le cadre de notre ontologie MemoFuzzyOnto pour CAPTAIN MEMO, nous choisissons de représenter et de raisonner sur les intervalles temporels imprécis en faisant

Chapitre 6 : *Prise en compte de l'imprécision* dans les dates et les intervalles de temps : représentation et raisonnement

recours à notre approche avec une vue floue (approche 2). Le prototypage de CAPTAIN MEMO est décrit dans le chapitre suivant (chapitre 7).

CHAPITRE 7 :

Prototypage de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO

7.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons **le prototype de notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO** ainsi que quelques **évaluations** effectuées sur des personnes réelles.

L'état de l'art montre que les aide-mémoires existants pour les malades d'Alzheimer ou les personnes souffrant de perte mnésique ne sont qu'**en tout début de la recherche**. (1) En général, ils offrent **des interfaces utilisateurs non accessibles** à l'utilisateur (pas de prise en compte des défaillances sensorielles et intellectuelles), et elles ne s'adaptent pas aux stades successifs de la maladie et au profil du patient. (2) Ils **ne prennent pas en compte de l'imperfection des données saisies**, due principalement à la discordance mnésique (par exemple : pas de détection d'incohérences, etc.). Nous notons que c'est le soignant du malade qui alimente l'aide-mémoire par les données nécessaires (le patient devient passif). (3) Ils **ne supportent pas les données imprécises**, typiquement en ce qui concerne les données temporelles. (4) Leurs **systèmes de stockage ne sont pas « sémantiques »** (pas de liens entre les données stockées, etc.) (5) Ils ne supportent pas la **saisie et l'interrogation en langage naturel**. (6) Ils **ne supportent pas le multilinguisme et le multiculturalisme**. Nous notons en particulier qu'il n'existe pas un aide-mémoire développé en langue arabe et respectant la culture arabe. (7) Ils sont principalement **destinés aux patients à un stade avancé**.

Dans ce contexte, nous **proposons une prothèse de mémoire « intelligente »**, appelée **CAPTAIN MEMO**, destinée aux malades d'Alzheimer, pour pallier leurs problèmes mnésiques. Elle est proposée pour être utilisée **dès le stade très précoce** de la maladie. CAPTAIN MEMO est à la fois un **aide-mémoire**, un **stimulateur de la mémoire** et un **aide à la planification**. Par rapport aux travaux connexes, elle vise à offrir **des interfaces utilisateurs « intelligentes » basées sur un traitement sémantique des données, et s'adaptant au patient**. (1) Elle est basée sur une **ontologie temporelle, floue, multilingue et multiculturelle** MemoFuzzyOnto. (2) Elle offre **des interfaces utilisateurs accessibles** à cette classe particulière d'utilisateurs. Nous nous basons sur notre méthodologie InterfaceToAlz. Nous intégrons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph pour assurer **l'accessibilité du graphe de la famille et de l'entourage** du patient. (3) Elle est **tolérante à la saisie des données fausses**. Nous intégrons le prototype de l'approche DBE_ALZ pour estimer la crédibilité de chaque donnée saisie. Nous associons après des actions correctives. (4) Elle est **tolérante à la saisie des intervalles temporels précis et**

imprécis. Notre ontologie MemoFuzzyOnto est implémentée selon notre approche pour la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue et elle implémente le travail de [Herradi et al., 2017] pour représenter et raisonner sur ceux qui sont précis. (5) Elle est **multilingue et multiculturelle**. (6) Les interfaces utilisateurs du service Autobiographical Training sont **adaptatives**. (7) Les services MEMO_Calendring et E-Diary **gènèrent automatiquement des données supplémentaires**. (8) Le service MEMO_Calendring **supporte des entrées en langage naturel**.

Le présent chapitre est structuré comme suit. La section 7.2 présente l'état de l'art sur les aide-mémoires. La section 7.3 présente le prototype de notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO. La section 7.4 présente quelques évaluations effectuées dans le contexte de cette dernière. Dans la dernière section, nous terminons par une conclusion.

7.2. État de l'art sur les aide-mémoires

Nous présentons notre état de l'art sur les différents aide-mémoires disponibles dans la littérature. Nous classifions ces aide-mémoires en (1) **aides à la planification** (permettent d'alerter sur une tâche à exécuter) et (2) **stimulateurs de mémoire**.

7.2.1. Aides à la planification

Dans cette section, nous passons en revue quelques aides à la planification : Cogknow [Meiland et al., 2007], Wedjat [W. Y. Wang et al., 2009], iCare [Lv et al., 2010], AP@LZ [Imbeault et al., 2010], aide à la planification de [Abu-Dalbouh et al., 2015], aide à la planification de [Ameta et al., 2015], My Pill Reminder [Xia et al., 2010], Mem-x Voice Reminder⁴², et myPill⁴³. Ces derniers sont présentés dans le Tableau 26.

Le critère « génération de données supplémentaires » : ce critère nous renseigne sur le fait que l'aide-mémoire génère ou pas automatiquement des données supplémentaires pour aider l'utilisateur à faire l'événement planifié.

Le critère « langage naturel » : ce critère nous renseigne sur le fait que l'aide-mémoire supporte ou pas la saisie et l'interrogation en langage naturel.

⁴² <http://www.mem-x.com/>

⁴³ <http://www.mypillapp.com/>

Tableau 25. Aides à la planification.

	Description	Utilisateur cible	Technologie utilisée	Langues supportées	Génération de données supplémentaires	Langage naturel
Cogknow	Aide à la planification des activités quotidiennes.	Les personnes atteintes de démence.	PDA	Anglais	Non	Non
Wedjat	Application de rappel de prise de pilule et de prise de médicaments.	Patients de tous âges.	Smartphone	Anglais	Non	Non
iCare	Application de rappel de prise de pilule et de prise de médicaments.	Personnes âgées.	Smartphone	Anglais	Non	Non
AP@LZ	Application de rappel de prise de pilule et de prise de médicaments.	Malades d'Alzheimer.	Smartphone, GPS	Français	Non	Non
Aide à la planification de [Abu-Dalbouh et al., 2015]	Aide à la planification des activités quotidiennes via des bips sonores.	Personnes âgées et malades d'Alzheimer.	Smartphone	Anglais	Non	Non
Aide à la planification de [Ameta et al., 2015]	Application de rappel de prise de pilule et de prise de médicaments via des mails ou SMS.	Patients + docteurs.	Smartphone	Anglais	Non	Non
My Pill Reminder	Application de rappel de prise de pilule et de prise de médicaments.	Personnes âgées.	Smartphone	Anglais	Non	Non
Mem-x Voice Reminder	Il agit comme une alarme qui sonne à des dates et heures bien précises pour rappeler	Personne âgée ou ayant une déficience de la mémoire.	Un appareil de la taille d'un téléphone	Français	Non	Non

	la personne, à travers des voix familières préenregistrés à l'avance, les tâches à effectuer.		portable (65 gr)			
myPill	Application de rappel de prise de pilule et de prise de médicaments.	Patients de tous âges.	Smartphone	Anglais	Non	Non

7.2.2. Stimulateurs de mémoire

Dans cette section, nous passons en revue quelques aide-mémoires visant à stimuler la mémoire de leurs utilisateurs. La plupart de ces derniers sont conçus en tant que des jeux de type « question-réponse » : stimulateur de mémoire de [Chilukoti, 2007], Zpaly [Makedon et al., 2010], StimCards [Jost et al., 2012], Savion [Sarne-Fleischmann, 2013] et Adcope [Zmily et Abu-Saymeh, 2013]. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 26. Stimulateurs de mémoire (jeux de type « question-réponse »).

	Utilisateurs cibles	Thème des questions	Réglage du niveau de difficulté des questions	Technologie utilisée	Langage naturel
Stimulateur de mémoire de [Chilukoti, 2007]	Les personnes atteintes de démence	Des connaissances générales.	Non réglable	Bicyclette + PC, C#, jeu	Non
Zpaly	Malades d'Alzheimer (premier stade).	Des connaissances générales.	Non réglable	Jeu	Non
StimCards	Tous les publics (malades d'Alzheimer, enfants, etc.)	Des connaissances générales + la possibilité de création des questions personnalisées.	Non réglable	Jeu, Java	Non
Savion	Les personnes atteintes de démence +	Compétences linguistiques,	Réglable par l'utilisateur	3D, interactions	Non

	personnes âgées.	calcul, mémoire non verbale et compétences visuo-spatiales.		tactiles, clavier + souris	
Adcope	Malades d'Alzheimer	Des connaissances générales.	Non réglable	Smartphone	Non

Notons aussi l'existence d'une application appelée Backup Memory [Pai, 2015] qui a pour objectif de stimuler la mémoire des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. L'aidant du malade peut télécharger des photos correspondant à des souvenirs marquants. Celles-ci sont ensuite diffusées sur le smartphone du malade à des moments précis. Elle est disponible en langues anglaise et française.

7.2.3. Discussion

Interaction homme-machine : la plupart des aide-mémoires existants ne prennent pas en compte les problèmes liés à l'interaction homme-machine. Par exemple, l'application Backup Memory utilise la couleur bleue avec deux dégradations différentes pour le texte et pour l'arrière-plan. Ce contraste très faible gêne l'utilisateur généralement vieux et souffrant de problèmes visuels. Seul Cogknow et Mem-x Voice Reminder offrent des interfaces utilisateurs vocales. Cependant, les utilisateurs ne peuvent pas administrer l'arrière-plan sonore selon leur choix (ajuster le volume, réécouter le message, etc.). En général, les interfaces utilisateurs des différents aide-mémoires ne sont pas personnalisées (ajuster la taille du texte, le contraste des couleurs, etc.). Les aide-mémoires existants ne supportent pas les entrées (saisie et interrogation) en langage naturel.

Aucun de ces aide-mémoires n'offre des interfaces utilisateurs drôles pour attirer l'attention des utilisateurs.

Interfaces utilisateurs non-tolérantes aux imperfections : les aide-mémoires existants n'offrent pas des interfaces utilisateurs tolérantes aux imperfections des données saisies. Par exemple, elles ne détectent pas les incohérences et les données fausses. C'est pour cela que c'est l'aidant qui alimente l'aide-mémoire et non pas le patient (le patient est passif et dépendant).

Système de stockage : les systèmes de stockage ne sont pas « sémantiques » (pas de liens entre les données stockées, pas de recherche de similarité). De plus ils n'intègrent pas de

moteur d'inférence de nouvelles données par déduction. Cogknow est le seul aide-mémoire basé sur une ontologie pour la modélisation de la couche de données.

Contenu non adaptatif des jeux de type « question-réponse » : tous les aide-mémoires offrant des jeux de type « question-réponse » ne sont pas adaptatifs dans le sens où ils ne fournissent pas des questions relatives au profil de l'utilisateur. Ils ne sont pas liés à la vie personnelle de l'utilisateur. Ils offrent seulement un ensemble pré-défini de questions basées sur des connaissances générales.

Services offerts : Backup Memory est le seul aide-mémoire qui vise à rappeler au patient d'Alzheimer des renseignements sur sa famille (ce qui est très utile pour la socialisation). Cependant, elle se limite à l'affichage des données saisies par l'aidant (photo, nom, prénom et lien de parenté avec le patient) : pas de moteur de recherche, pas de moteur d'inférence, pas d'affiche de l'arbre généalogique, pas d'interrogation, pas de training, pas de lien avec la planification des activités.

Multilinguisme et multiculturalisme : les aide-mémoires existants ne prennent pas en compte le multilinguisme et le multiculturalisme. Nous notons en particulier qu'il n'existe pas d'aide-mémoire conçus nativement pour la langue arabe, incluant les concepts qui lui sont propres.

Hardware : « L'ordinateur est l'appareil le plus facile à prendre en main pour un senior » [Weenect, 2017]. Cependant, la plupart des aide-mémoires sont des applications pour les Smartphones (petit écran).

7.3. Présentation de notre prototype de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO

Notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO est destinée à aider son utilisateur à **pallier les problèmes mnésiques**. Elle est conçue principalement pour être utilisée par **des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer**. Elle peut être aussi utilisée par des personnes âgées souffrant de pertes de mémoire.

Le prototype de CAPTAIN MEMO est proposé pour être utilisé **dès le stade très précoce de la maladie d'Alzheimer** (le diagnostic pourra très prochainement être posé 20 à 30 ans avant que la maladie ne devienne totalement invalidante [Dubois et al., 2009]). L'idée est que le patient au premier stade peut agir et être véritablement actif d'une part en stockant

dans sa « prothèse de mémoire » les données qu'il va inexorablement perdre, et d'autre part pour rendre l'utilisation d'une prothèse acquise le plus tôt possible. Au fur et à mesure que la maladie progresse CAPTAIN MEMO les lui restituera ces données via un ensemble de services. Elle est en même temps **un stimulateur de mémoire et un aide à la planification.**

Notre prothèse de mémoire a les objectifs suivants : (1) améliorer la qualité de vie du malade d'Alzheimer ; (2) permettre de rester le plus longtemps possible en autonomie, de dépasser la peur et la honte d'oublier. Cela permet de retarder l'heure de la maison de retraite, ce crève-cœur qui annonce la dernière étape ; (3) maintenir la vie sociale ; (4) stimuler la mémoire du patient ; et (5) suppléer l'aidant.

Par rapport aux travaux connexes, CAPTAIN MEMO vise à offrir des **interfaces utilisateurs « intelligentes » basées sur un traitement sémantique des données, et s'adaptant au patient :**

- **Elle gère sémantiquement les données.** Nous structurons les données du patient selon l'**ontologie temporelle, floue, multilingue et multiculturelle** MemoFuzzyOnto. Elle interagit avec **Facebook** et **DBpedia**. Nous associons un **moteur d'inférence** (règles SWRL et règles IF-THEN de Mamdani) pour inférer de nouvelles données ;
- **Elle offre des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer.** Elles sont **adaptées aux besoins spécifiques de notre utilisateur particulier, vocales, multimodales, amusantes et personnalisées.** Nous nous basons sur notre méthodologie InterfaceToAlz. La conception de ces interfaces fait recours à notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie. Pour assurer l'accessibilité du graphe de la famille et de l'entourage du propriétaire de la prothèse, nous intégrons dans le prototype de CAPTAIN MEMO notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph ;
- **Elle est tolérante à la saisie des données fausses.** Nous intégrons le prototype de notre approche DBE_ALZ dans le prototype de CAPTAIN MEMO pour estimer la crédibilité de chaque donnée saisie. Nous associons après un ensemble d'actions permettant de garantir la qualité des services générés ;
- **Elle est tolérante à la saisie des intervalles temporels précis et imprécis.** Elle est basée sur l'ontologie MemoFuzzyOnto qui implémente le travail de [Herradi et al., 2017] et notre approche avec une vue floue pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels précis et imprécis ;

- **Elle est multilingue et multiculturelle.** Elle supporte trois langues : anglais, français et arabe ;
- Les exercices du service Autobiographical Training sont **adaptatifs** et s'ajustent automatiquement au malade d'Alzheimer (sa vie personnelle et le stade de la maladie d'Alzheimer) ;
- Les services MEMO_Calendring et E-Diary **gènèrent automatiquement des données supplémentaires** ;
- Le service MEMO_Calendring supporte **la saisie en langage naturel**.

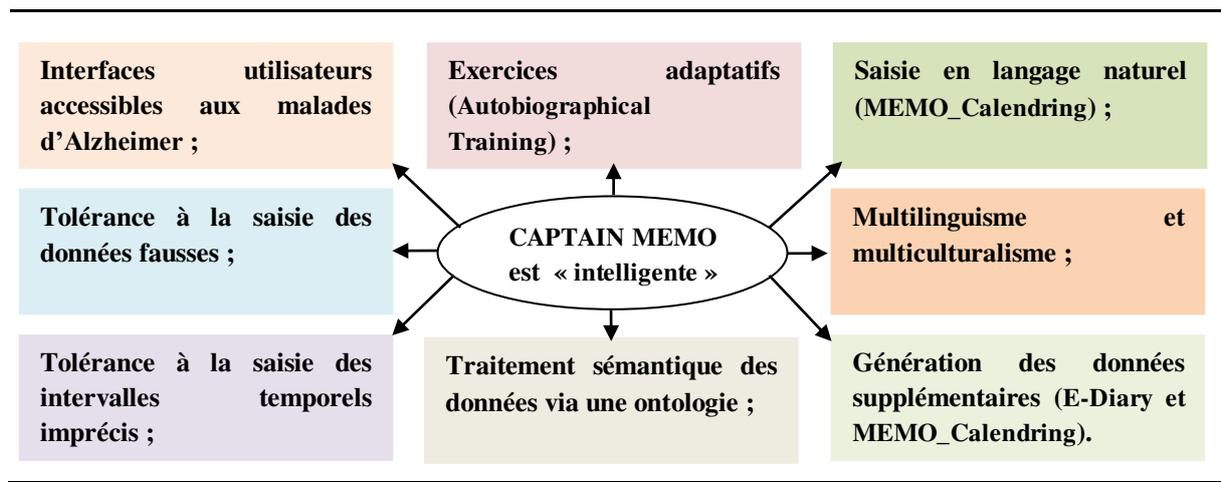


Figure 58. Critères déterminant l'intelligence de CAPTAIN MEMO.

7.3.1. Architecture

Nous implémentons un prototype mettant en œuvre notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO. C'est une application du **web sémantique** qui est basée sur la plateforme **J2EE**, le paradigme **MVC** et l'architecture **3-tiers**. Nous utilisons le serveur d'application Glassfish, le serveur HTTP Apache, et la librairie **JENA**.

L'architecture générale de notre prototype est fondée sur une architecture 3-tiers. La couche présentation a en charge la présentation des interfaces utilisateurs qui sont conçues selon notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie. La couche traitement est l'implémentation des quatre services offerts. Cette couche fait référence au prototype de notre outil de visualisation Memo Graph et au prototype de notre approche DBE_ALZ. La couche de données est représentée par la base de connaissances du patient qui est structurée selon l'ontologie MemoFuzzyOnto et les couches de données des prototypes de Memo Graph et DBE_ALZ. La Figure 59 présente l'architecture générale de CAPTAIN MEMO.

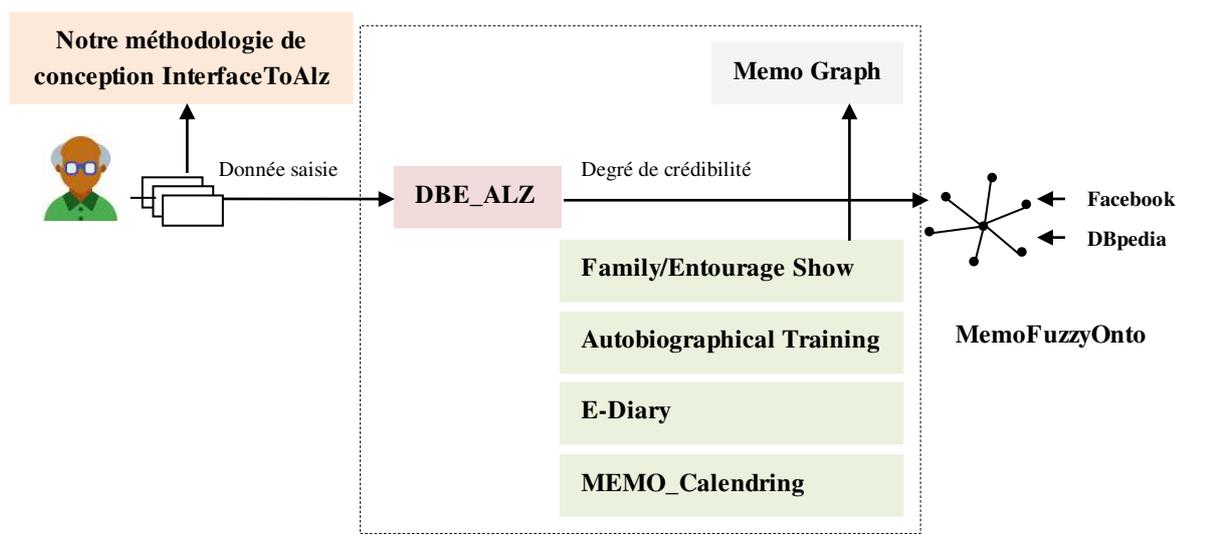


Figure 59. Architecture du prototype de CAPTAIN MEMO.

7.3.2. Services offerts

Le prototype de CAPTAIN MEMO offre quatre services : Family/Entourage Show, Autobiographical Training, E-Diary et MEMO_Calendring.

7.3.2.1. Family/Entourage Show

Ce service phare de la prothèse de mémoire a pour objectif de fournir au malade d'Alzheimer les éléments nécessaires à **la socialisation** (les éléments nécessaires pour pouvoir soutenir une conversation) et par effet de bord de **stimuler sa mémoire**. Il permet à l'utilisateur de stocker des renseignements sur lui-même, son entourage familial et convivial (par exemple : dates d'anniversaire, date de mariage, naissance des enfants, chansons préférées, métier, plats préférés, lien vers son compte Facebook, etc.) et les événements qu'ils ont vécus ensemble (par exemple : cadeaux reçus, visites de musées, etc.). Il restitue ces données via un ensemble de services : **l'affichage d'un graphe de la famille et de l'entourage du patient**, la recherche par lien dans ce graphe (prénom de son médecin, nom de sa coiffeuse, etc.), la recherche d'une personne via le graphe ou un critère concernant la personne ou les événements vécus avec elle, afficher les photos, etc.

La **visualisation du graphe de la famille et de l'entourage se fait par notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph**. Nous intégrons cet outil dans le prototype de CAPTAIN MEMO. Grâce aux fonctionnalités de Memo Graph, le graphe généré est accessible à notre utilisateur particulier. Les données visualisées sont structurées selon notre ontologie MemoFuzzyOnto. Nous n'affichons pas la TBox (nous appliquons des filtres).

Nous concaténons la dimension temporelle à la propriété d'objet pour représenter le temps par des liens étiquetés entre les nœuds. La Figure 60 montre un graphe de la famille et de l'entourage, généré à partir d'un jeu de données structuré selon MemoFuzzyOnto à l'aide de Memo Graph.

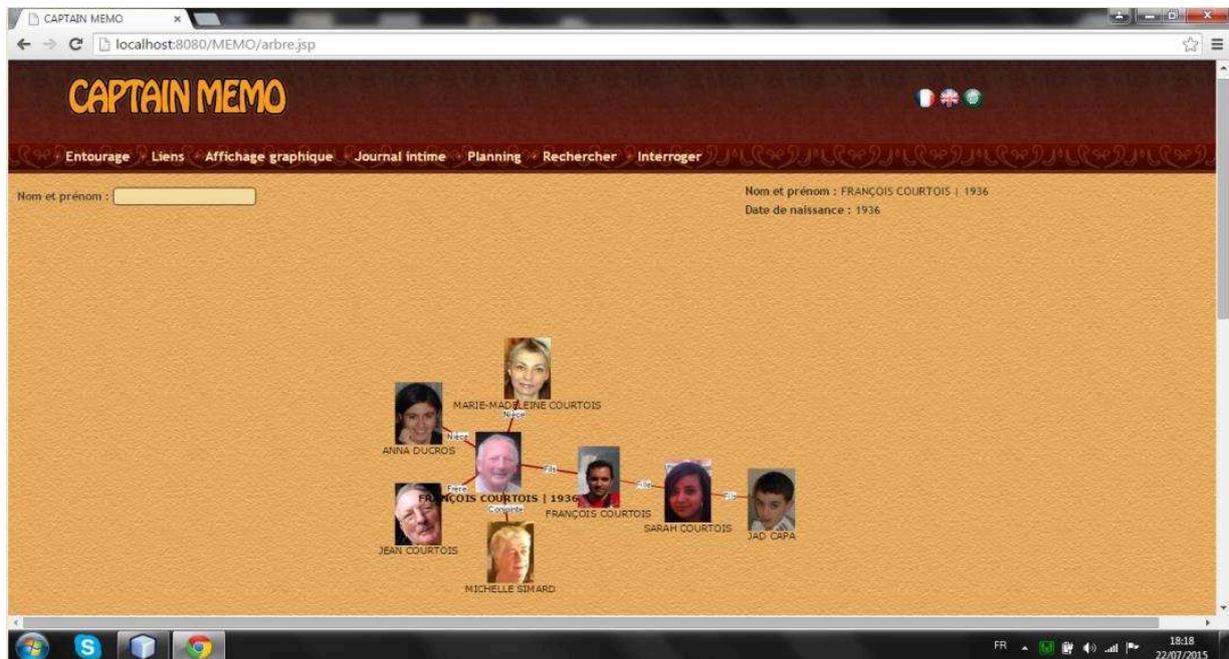


Figure 60. Un graphe familial généré à l'aide de Memo Graph.

7.3.2.2. Autobiographical Training

Autobiographical Training est **un jeu de type « questions et réponses »** conçu pour **stimuler la mémoire du malade d'Alzheimer** et l'aider à retenir quelques données nécessaires à **la socialisation**. Ce jeu est **adaptatif**, c'est-à-dire qu'il s'adapte automatiquement selon le profil du patient. En d'autres termes, **il génère des questions en se basant sur sa vie autobiographique** et **il ajuste le niveau de difficulté selon le stade d'évolution de cette maladie**.

Contrairement aux travaux connexes qui incluent des questions basées des connaissances générales ou des exemples fictifs, les questions générées à l'aide d'Autobiographical Training sont **générées en se fondant sur la vie personnelle du patient** (par exemple : membres de la famille, événements vécus, etc.). Ces questions sont basées sur les données initialement saisies et inférées. Chaque patient d'Alzheimer a sa propre collection de questions et de réponses. La Figure 61 montre une question générée au patient d'Alzheimer.



Figure 61. Exemple de question générée au patient d'Alzheimer.

L'algorithme d'Autobiographical Training **prend en compte les différents stades d'évolution de la maladie d'Alzheimer**. En effet, **il définit 3 niveaux de difficulté des questions** $L_J = \{L_1, L_2, L_3\}$. L_1 représente le niveau de difficulté le plus facile. L_3 représente le niveau de difficulté le plus dur. L_1 englobe des questions qui ont pour objectif de rappeler le patient de lui-même et de ses parents au premier degré, sans entrer dans les détails, par exemple « Quel est votre travail ? » et « Quel est le nom de votre fils ? ». L_2 englobe des questions qui ont pour objectif de rappeler le patient de ses parents du deuxième degré, par exemple : « Où habite votre cousin Pierre ? ». L_3 englobe des questions qui ont pour objectif de rappeler le patient d'un ensemble de détails relatifs à sa famille, son entourage et des événements qu'il a vécus, par exemple : « Quand vous avez voyagé à Paris ? » et « Quel est le nom de votre infirmière ? ». Cette classification de questions est validée par une neurologue de l'hôpital Habib Bourguiba de Sfax en Tunisie.

Chaque question est identifiée par un numéro unique I/J (la question I du niveau de difficulté J). Pour chaque niveau de difficulté L_J , nous définissons un ensemble de questions $C_J = \{Q_{1/J} \dots Q_{80/J}\}$ (C_J se compose de 80 questions). $Q_{1/J}$ est la question la plus facile, devenant de plus en plus difficile jusqu'à la dernière question $Q_{80/J}$ qui est la plus difficile. Pour les trois niveaux de difficulté, les questions et l'ordre associé sont validés par la neurologue.

L'algorithme commence chaque session d'exercices par la question $Q_{1/1}$. Si le patient répond avec succès à 10 questions successives d'un niveau de difficulté L_J , le reste des questions de ce niveau de difficulté est ignoré et il recommence à afficher les questions du niveau de difficulté L_{J+1} .

Après chaque question, le patient d'Alzheimer est invité à saisir la réponse. Si la réponse est incorrecte, la bonne réponse est affichée et la question est répétée plus tard. La Figure 62 montre l'interface utilisateur affichant le message « Bravo ! Votre réponse est correcte ! » associé à la question affichée dans la Figure 61.



Figure 62. Feedback associé à la réponse de la question affichée dans la Figure 61.

Autobiographical Training vise à rappeler le patient d'Alzheimer de sa famille. Cependant, les liens familiaux dépendent complètement de la culture et de la langue. Notre algorithme prend en compte les différences qui peuvent exister entre les cultures et les langues (anglais, français et arabe).

Pour chaque question $Q_{I/J}$, nous définissons un algorithme $ALQ_{I/J}$. Il prend en entrée l'identifiant unique I/J de $Q_{I/J}$ et la langue/culture choisie. Il renvoie l'alternative correspondante de $Q_{I/J}$. L'algorithme 4 présente une partie de $ALQ_{2/2}$ associée à la question $Q_{2/2}$ qui porte sur le prénom du cousin.

1- Selon (Langue)

Cas Anglais:

$Q_{2/2} :=$ “What is the name of your cousin?”

Cas Français:

Si (Cousin est un “Homme”) Alors

$Q_{2/2} :=$ « Quel est le prénom de votre cousin? »

Si non

$Q_{2/2} :=$ « Quel est le prénom de votre cousine? »

Fin si

Algorithme 4. Algorithme $ALQ_{2/2}$ associé à la question $Q_{2/2}$.

La Figure 63 représente une capture d’écran du prototype de CAPTAIN MEMO qui montre une question générée en langue arabe.



Figure 63. Une question générée au patient d’Alzheimer en langue arabe.

Pour chaque question $Q_{I/J}$, un algorithme $ALV_{I/J}$ est associé. $ALV_{I/J}$ vérifie si la réponse de $Q_{I/J}$ est disponible ou non (à partir des données initialement saisies et les données inférées). Si la réponse n’est pas disponible, $Q_{I/J}$ est ignoré. Dans le cas contraire, il est affiché au patient.

Après chaque session d’exercices, l’algorithme affiche le total des questions posées, le niveau de difficulté actuel et le pourcentage de réponses correctes (“Successful Score”). Il évalue la capacité du patient à répondre aux questions générées, en comparant le “Successful Score” aux sessions précédentes. L’algorithme général d’Autobiographical Training est le suivant :

Entrée: *Données saisies par le malade d'Alzheimer ou un utilisateur de son entourage, base de questions préétablie*

Sortie: Un ensemble de questions, successful score.

1- Langue := anglais ou français ou arabe ;

2- $I := 1$; $J := 1$; /* Initialiser L_J avec L_1 et Initialiser $Q_{I/J}$ avec $Q_{1/1}$ */

3- **Tant que** (le patient utilise encore Autobiographical Training **ET** La base de questions préétablie a encore des questions) **faire**

3.1- $C_J := C_J - Q_{I/J}$; /* Suppression de $Q_{I/J}$ de la file d'attente C_J */

3.2- $Q_{I/J} := ALQ_{I/J}$; (I/J , Langue);

3.3- **Si** ($ALV_{I/J}(Q_{I/J})$ retourne « Indisponible ») **Alors**

$Q_{I/J}$ est ignoré ;

Si non

$Q_{I/J}$ is affiché ;

Si (la réponse est correcte) **Alors**

Un feedback positif est affiché ;

Si non

Un feedback négatif est affiché, La bonne réponse est affichée ;

$C_J := C_J + Q_{I/J}$; /*Re-ajouter $Q_{I/J}$ à la file d'attente C_J , Re-afficher $Q_{I/J}$ */

Fin si

Fin si

3.4- **Si** ($I=80$ /* C_J n'a pas plus de question */ **OU** L'utilisateur répond avec succès à 10 questions successives) **Alors**

$J := J + 1$; /* Le niveau de difficulté suivant (L_{J+1}) */

$I := 0$;

Fin si

3.5- $I := I + 1$; /* La question suivante ($Q_{I+1/J}$) */

Fin tant que.

Algorithme 5. Autobiographical Training.

7.3.2.3. E-Diary

Comme son nom l'indique, ce service permet au malade d'Alzheimer de **raconter les principaux événements de sa journée** : ses pensées, ses problèmes de santé, les symptômes ressentis, les personnes rencontrées, ses coups de téléphone passés, ses émotions, etc. La Figure 64 montre une capture d'écran montrant l'interface utilisateur de saisie qui correspond à ce service.

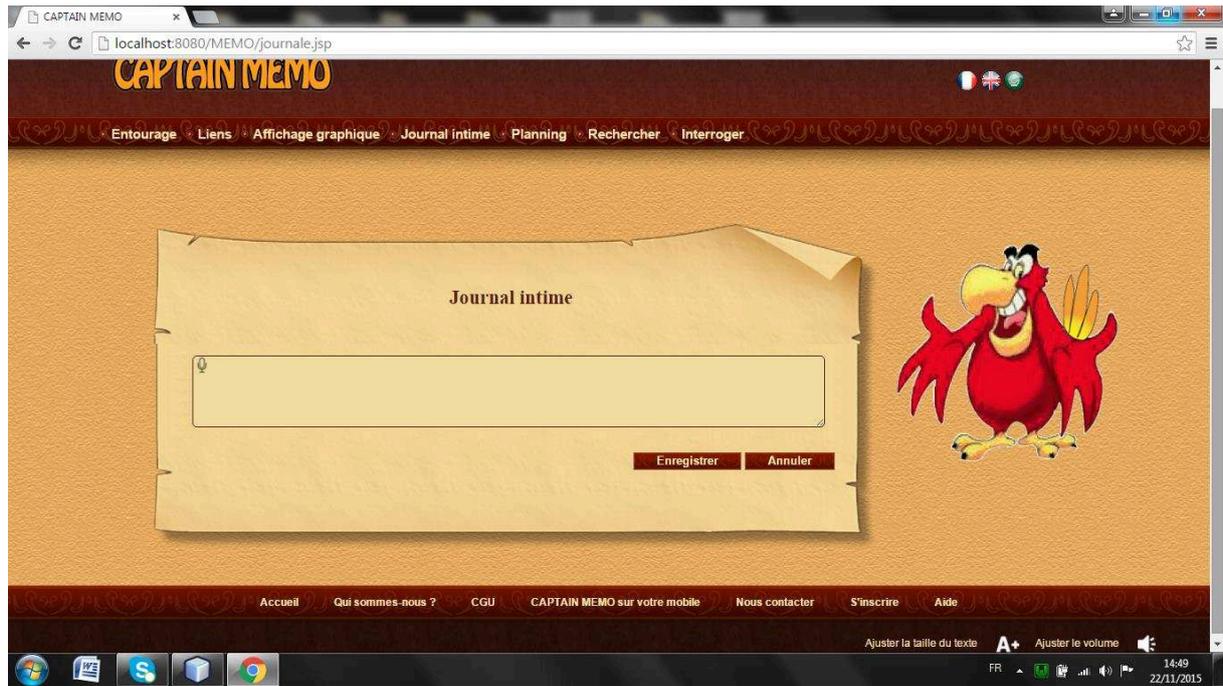


Figure 64. Interface utilisateur permettant l'édition d'E-Diary.

7.3.2.4. MEMO_Calendring

Cette section présente notre aide à la planification MEMO_Calendring. Il peut **rappeler au malade d'Alzheimer des tâches tout au long de la journée**. MEMO_Calendring émet une alerte 15 minutes avant l'heure planifiée de l'événement à effectuer. Sauf pour les rendez-vous, l'alerte est émise une heure à l'avance pour permettre au patient d'aller à l'endroit concerné. L'alerte est répétée jusqu'à ce qu'elle soit annulée par le patient. L'alarme peut être activée ou désactivée par le patient. Par rapport aux travaux connexes, MEMO_Calendring présente trois contributions :

- Il **analyse sémantiquement les données saisies par l'utilisateur pour générer automatiquement des données supplémentaires** permettant de l'aider à effectuer l'événement planifié ;
- Il **supporte les entrées en langage naturel** ;
- Il est **lié à l'ontologie MemoFuzzyOnto** qui structure les données personnelles du patient.

La Figure 65 montre l'interface utilisateur de l'édition des événements planifiés. Elle supporte les entrées en langage naturel.

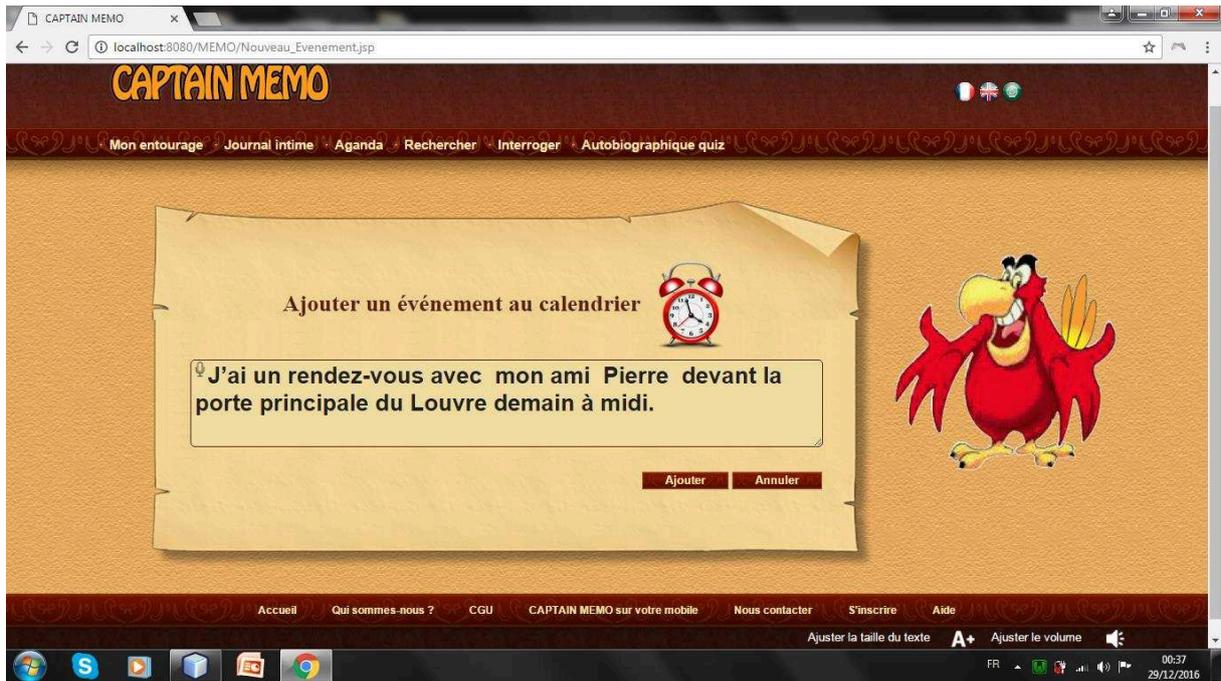


Figure 65. Interface utilisateur permettant l'édition des événements planifiés.

La Figure 66 montre l'interface utilisateur de notification associée à l'événement planifié présenté dans la Figure 65.



Figure 66. Interface utilisateur de notification associée à l'événement planifié présenté dans la Figure 65.

Génération automatique de données supplémentaires

MEMO_Calendring **génère automatiquement des données supplémentaires relatives à l'événement planifié**. Par exemple, si le patient saisit : « Je visiterai Pierre demain à 10 heures du matin » ; il affiche les données initialement saisies relatives à Pierre comme sa photo et son adresse. En général, les données supplémentaires sont extraites, via des requêtes SPARQL, de la base de connaissances du malade et/ou du jeu de données ouvertes liées DBpedia. Pour chaque événement planifié, MEMO_Calendring effectue les phases suivantes :

- **Annotation sémantique** : cette phase consiste à identifier les concepts de la base de connaissances du malade structurée selon MemoFuzzyOnto et/ou du de données ouvertes liées DBpedia, du texte de l'événement planifié saisi en langage naturel (instance d'une classe, des propriétés de type de données, des propriétés d'objet, etc.). Prenons l'exemple de l'événement planifié présenté dans la Figure 61. Trois concepts sont identifiés : « ami » est identifié en tant que propriété d'objet de MemoFuzzyOnto, « Pierre » est une instance de la classe Personne de MemoFuzzyOnto et « Louvre » est une instance de DBpedia ;
- **Interrogation des bases de connaissances** : cette phase consiste à interroger la base de connaissances du patient et/ou DBpedia, via des requêtes SPARQL pour générer des données supplémentaires concernant les entités identifiées. Il génère automatiquement les requêtes SPARQL à l'aide d'un ensemble de patrons prédéfinis.

Par exemple, il génère, via des requêtes SPARQL, des données supplémentaires relatives à l'événement planifié présenté dans la Figure 65. Il extrait l'adresse du Louvre de DBpedia et la photo de Pierre de la base du patient. La Figure 67 résume les étapes.

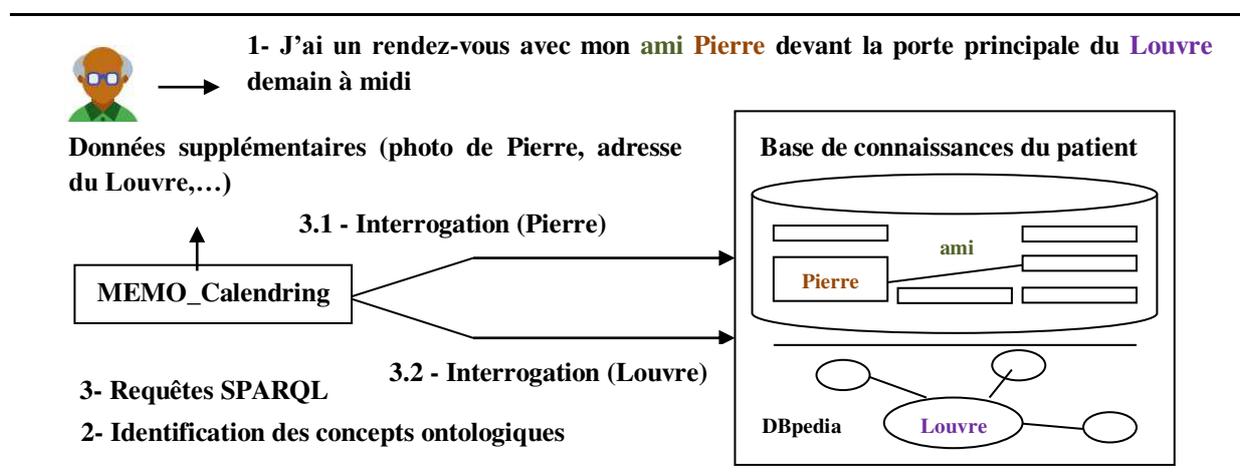


Figure 67. Génération des données supplémentaires avec MEMO_Calendring.

Support des entrées en langage naturel

MEMO_Calendring **supporte les entrées en langage naturel**. Nous définissons un dictionnaire temporel et multilingue (anglais, français et arabe). Ce dernier est composé d'entités temporelles floues qui peuvent être saisies par l'utilisateur et qui doivent être reconnues par notre aide à la planification, par exemple : « la semaine prochaine », « mercredi » et « ce soir ». Pour chaque entité temporelle floue, nous associons un algorithme qui retourne la date et/ou l'heure correspondante(s), comme le montre la Figure 68.

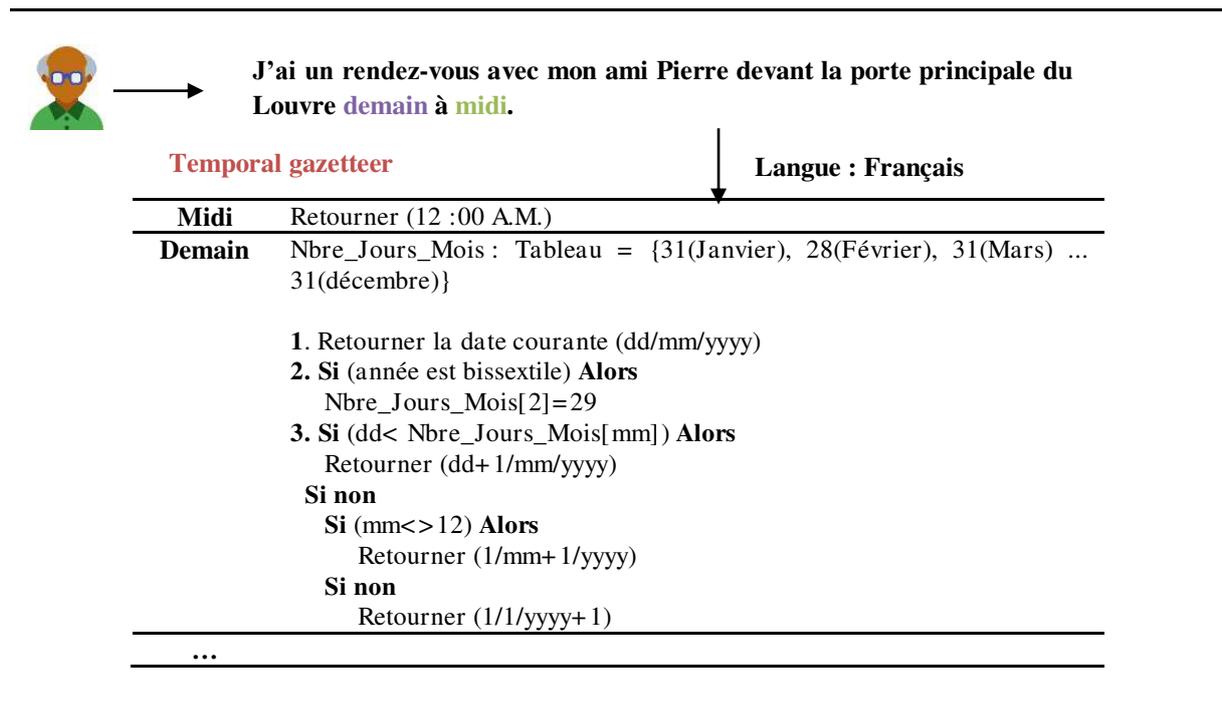


Figure 68. Reconnaissance des entités temporelles floues.

7.3.3. Notre ontologie MemoFuzzyOnto

Dans le contexte de notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO, nous choisissons de structurer les données stockées selon une **ontologie**. Ce choix est justifié par le fait qu'elle permet de représenter la « **sémantique** » des données et de déduire des nouvelles données à partir de celles qui sont saisies grâce à un **moteur d'inférence**. Dans cette section, nous présentons l'ontologie MemoFuzzyOnto qui représente les données personnelles du malade d'Alzheimer dans le cadre de notre prothèse de mémoire. C'est une ontologie **temporelle, floue, multilingue et multiculturelle**.

7.3.3.1. Méthode de construction

Dans cette section, nous présentons les étapes que nous suivons pour la construction de l'ontologie MemoFuzzyOnto. Premièrement, **nous choisissons l'ontologie multilingue et multiculturelle PersonLink** pour représenter et raisonner sur les liens interpersonnels. Deuxièmement, **nous étendons cette dernière**. Nous ajoutons des concepts et des relations supplémentaires permettant de modéliser toutes les données personnelles de notre propriétaire de la prothèse de mémoire. Troisièmement, nous étendons notre ontologie pour **représenter et raisonner sur les intervalles temporels précis et imprécis**. La Figure 69 résume ces étapes.

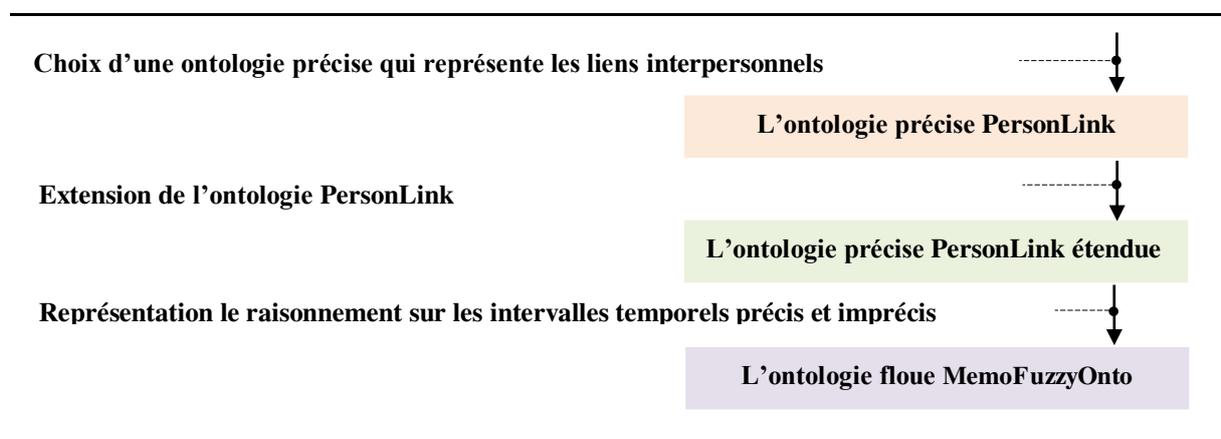


Figure 69. Méthode de construction de notre ontologie MemoFuzzyOnto.

7.3.3.2. Choix de l'ontologie PersonLink

Notre prothèse de mémoire doit traiter des liens en anglais, français et arabe afin d'être utilisable dans différentes langues et cultures. Cependant, les liens familiaux dans ces trois langues ne sont pas les mêmes. Certains liens n'existent pas dans toutes les langues, par exemple « parrain » ou « mère porteuse » n'existent pas en arabe. En revanche pour le terme anglais « cousin » la langue arabe possède 8 termes, selon qu'ils sont filles ou garçons et issues du frère ou de la sœur du père ou de la mère. Nous choisissons l'ontologie multilingue et multiculturelle PersonLink [Herradi et al., 2015a] pour la modélisation, le stockage et le raisonnement sur les liens familiaux, car elle répond à ces exigences. PersonLink est représentée en OWL 2 et un ensemble de règles SWRL. Elle est publiée sur le site Linked Open Vocabularies (LOV)⁴⁴ du web des données. L'ontologie PersonLink contient 3 classes (« personne », « homme » et « femme »), 86 propriétés et 582 règles. La Figure 70 montre un extrait du diagramme de classes représentant PersonLink.

⁴⁴ <http://lov.okfn.org/dataset/lov/>

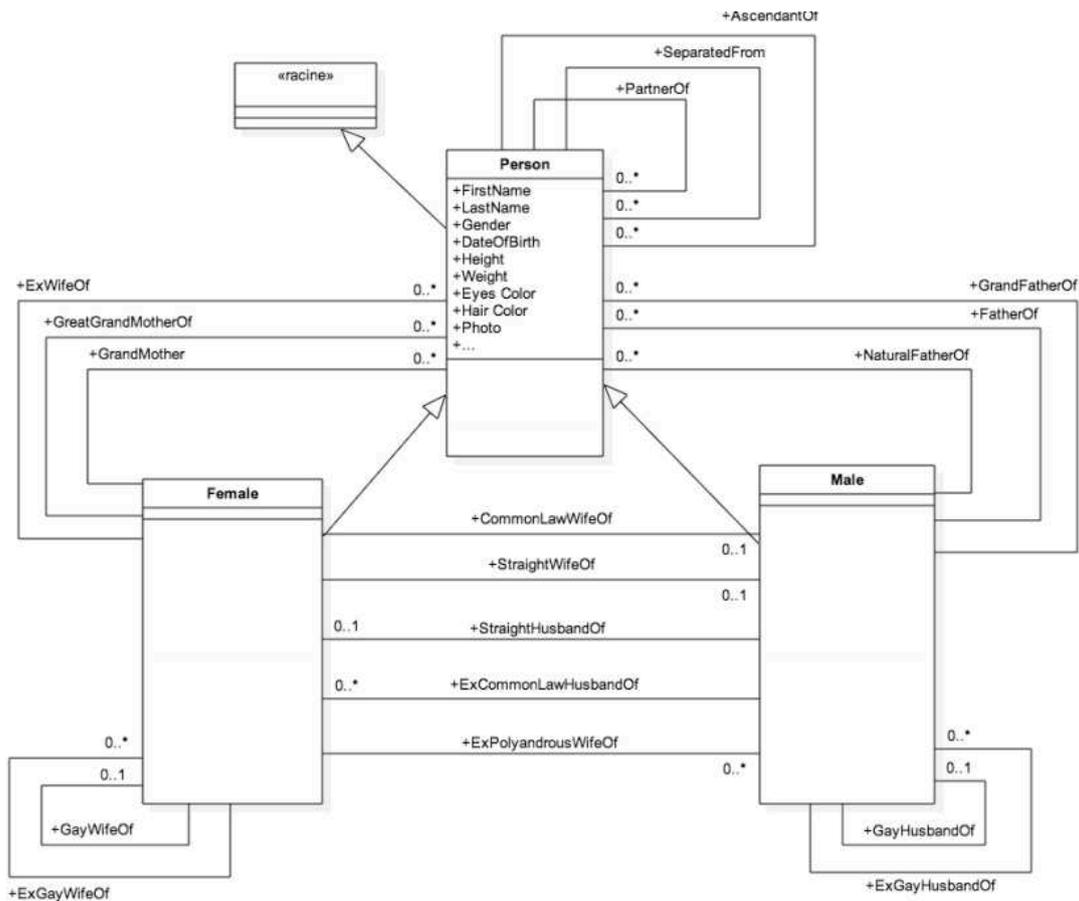


Figure 70. Diagramme de classes de l'ontologie PersonLink [Herradi 2015]

7.3.3.3. Extension de l'ontologie PersonLink

Nous étendons l'ontologie précise PersonLink pour représenter les autres informations personnelles du malade d'Alzheimer dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Nous ajoutons des composants précis pour modéliser les données suivantes :

- **Données personnelles des membres de la famille et de l'entourage du patient :** nous définissons un ensemble de données permettant de décrire les membres de la famille et de l'entourage du patient : nom, prénom, date de naissance, email, adresse, école, repas préféré, sport préféré, nationalité, pays, ville, etc. Ces dernières sont représentées en tant que propriétés de type de données pour les deux classes Personne et Patient (la classe Patient hérite de la classe Personne) ;
- **Liens conviviaux :** nous définissons un ensemble de liens conviviaux qui peuvent exister entre les personnes constituant l'entourage et la famille du patient ou le patient lui-même et son entourage. Nous classifions ces liens en **service** (pharmacien,

médecin, boulanger, épicier, etc.), **relation virtuelle** (ami Facebook, ami Skype, ami Twitter, etc.), **scolarité et emploi** (collègue, chef service, etc.), **amitié et voisinage**. Chaque lien est représenté par une propriété d'objet précise entre deux instances de la classe Personne ou une instance de la classe Personne et une instance de la classe Patient ;

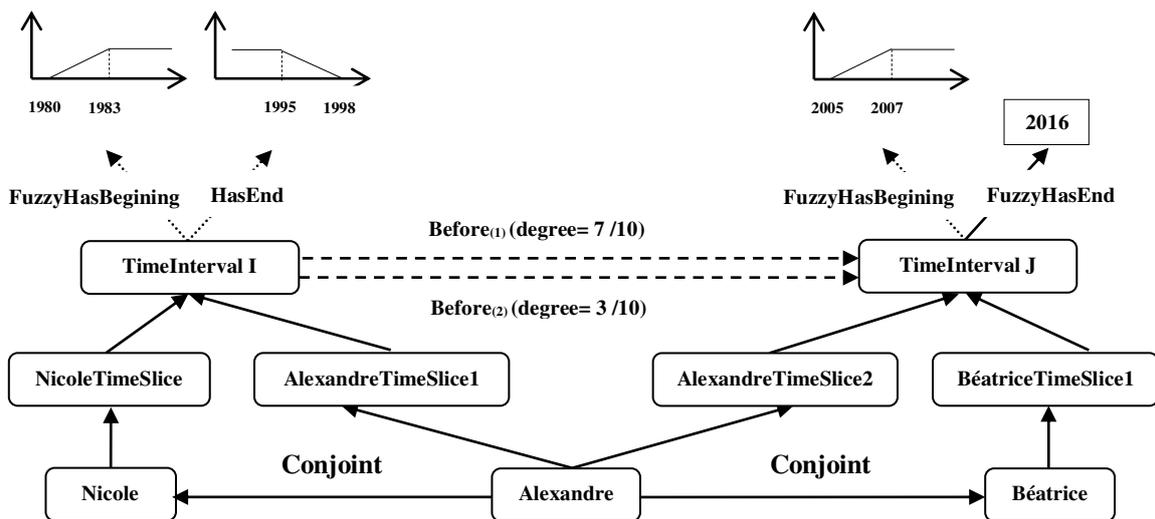
- **Représentation des données extraites à partir de Facebook** : le réseau Facebook est aujourd'hui le plus populaire de tous les réseaux sociaux. Il est une source très riche en informations personnelles : nom, prénom, date de naissance, email, adresse, école, employeur, état matrimonial, orientation politique, liens familiaux, etc. L'extraction de ces données peut nous aider à avoir plus d'information concernant une personne donnée. Dans cette direction, nous avons étendu PersonLink par l'ajout des concepts et des propriétés qui permettent de modéliser les données extraites à partir du Facebook. Les données extraites à partir de Facebook concernent les **données personnelles de la personne** (liste d'amis, albums de photos, etc.) ainsi que ses **préférences** (vidéos partagées, événements programmés, groupes, etc.).

7.3.3.4. Temporalité

Nous classifions les liens interpersonnels en deux catégories : **les liens interpersonnels qui ne dépendent pas du temps** (par exemple : « mère » et « père ») **et ceux qui évoluent au cours du temps** (par exemple : « Alexandre s'est marié à Nicole. Après le divorce, il s'est remarié à Béatrice »). La temporalité de ces liens temporels doit être prise en compte par MemoFuzzyOnto. Les données temporelles peuvent être saisies d'une façon précise ou imprécise :

- **Modélisation et raisonnement sur les intervalles temporels précis** : nous avons eu recours au travail de [Herradi et al., 2017]. Les auteurs se fondent sur l'approche 4D-fluents pour modéliser et raisonner les intervalles temporels précis dans le cadre d'une ontologie formalisée en OWL 2. Puis, ils proposent un ensemble de règles SWRL pour inférer les relations temporelles d'Allen classiques ;
- **Modélisation et raisonnement sur les intervalles temporels imprécis** : pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels imprécis, nous avons recours à notre approche avec une vue floue représentée dans le chapitre précédent. La Figure 71 montre l'évolution du lien familial « Conjoint » dans le cadre de l'ontologie MemoFuzzyOnto. Nous considérons l'exemple saisi par l'utilisateur du prototype de CAPTAIN MEMO suivant : « Alexandre s'est marié à Nicole juste après qu'il a eu

son diplôme de doctorat. Alexandre a terminé ses études doctorales en 1980. Leur mariage dure 15 ans. Alexandre s’est remarié à Béatrice depuis environ 10 ans et ils ont divorcé en 2016 ». Soit $I = [I^-, I^+]$ et $J = [J^-, J^+]$ deux intervalles temporels imprécis représentant, respectivement, la durée du mariage d’Alexandre avec Nicole et celle avec Béatrice. I^- est représenté par la propriété de type de données floue “FuzzyHasBeginning” qui se caractérise par une fonction d’appartenance monotone croissante avec $A=1980$ et $B=1983$. I^+ est représenté par la propriété de type de données floue “FuzzyHasEnd” qui se caractérise par une fonction d’appartenance monotone décroissante avec $A=1995$ et $B=1998$. J^- est représenté par la propriété de type de données floue “FuzzyHasBeginning” qui se caractérise par une fonction d’appartenance monotone croissante avec $A=2005$ et $B=2007$. J^+ est représenté par la propriété de type de données précise “HasEnd” ayant la valeur « 2016 ».



```
(define-concept Rule5 (g-and (some Proceed(1) Fulfilled) (some Before(1) True))) (instance facts (=Proceed(1) (1998 - 2005)))
(define-concept Rule6 (g-and (some Proceed(2) Fulfilled) (some Before(2) True))) (instance facts (=Proceed(2) (1998 - 2005)))
```

Figure 71. Une instantiation montrant la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de notre ontologie MemoFuzzyOnto.

7.3.4. Conception des interfaces utilisateurs

Dans cette section, nous présentons la conception des interfaces utilisateurs du prototype de CAPTAIN MEMO. Nous nous basons sur notre guide de bonnes pratiques

d'ergonomie pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer. Elles sont adaptées aux besoins spécifiques de ces utilisateurs particuliers, vocales, multimodales, amusantes et personnalisées. Pour décrire ces interfaces, nous avons recours aux critères d'ergonomie utilisés pour catégoriser les bonnes pratiques d'ergonomie de notre guide.

Eléments visuels : le contenu textuel est lisible (G5.2). En effet, nous utilisons 15-pt pour le texte affiché et 25-pt pour les titres. Nous utilisons la couleur noire pour le texte sur un fond clair et simple (G5.18, G5.19, G5.24, G5.25, G5.26, G5.27, G5.28) pour maximiser le contraste entre la couleur de l'arrière-plan et le texte en avant-plan (G5.21). L'interligne est 1,5 (G5.12). Le texte est aligné à gauche (G5.6, G5.7) et en minuscule (G5.10). Nous utilisons seulement la police Sans-Serif (G5.3, G5.4, G2.40). Les images et les icônes sont de grande taille (G5.1). La conception des interfaces utilisateurs est simple (G2.29). Nous évitons la décoration inutile (G2.34), les détails (G2.35), l'animation (G2.37) et des éléments inutiles qui attirent l'attention (G2.39). Nous divisons le panneau de l'interface aussi simple que possible. Chaque interface se compose de trois panneaux : le premier permet de visualiser le menu ; le second représente l'information à afficher et le dernier affiche le pied de page. Pour rendre ces trois panneaux plus distincts, nous attribuons à chacun une couleur différente (G2.27). Nous nous limitons à deux couleurs (G2.32). Nous affichons seulement les informations importantes (G2.31, G2.41). Ces dernières sont affichées au milieu de l'interface (G2.23). Les images sont utilisées seulement pour expliquer le contenu textuel (G2.33, G2.34, G2.36).

Audio : les interfaces utilisateurs sont vocales. Nous ajoutons un arrière-plan sonore pour supporter les utilisateurs dans leurs interactions (G5.37, G9.1). Nous utilisons, par défaut, un volume élevé (G6.1). Nous utilisons le « discours naturel » (G6.4) et une voix masculine (G6.3). Nous réduisons la vitesse de l'arrière-plan sonore (G6.5, G6.6). Nous n'ajoutons pas un fond musical (G2.51).

Contenu textuel et pictural : dans le but de concevoir des interfaces utilisateurs compréhensibles, nous utilisons un vocabulaire simple et facile à comprendre (G2.1). En effet, nous utilisons des phrases courtes (G5.15) et la forme active (G2.3). Nous exprimons une seule idée pour chaque interface. Nous attribuons à chaque interface un titre (G2.11). Nous n'utilisons pas les abréviations, les symboles (G2.2) et la double négation (G2.4). Nous surlignons les mots-clés en utilisant les caractères gras (G5.9). Dans le but d'ajouter l'humour, nous choisissons comme « personnage » de notre prothèse de mémoire, un perroquet Disney

(G3.3). Ce perroquet est vieux (G3.2). Ce choix est justifié par le fait que le perroquet a la capacité de répéter les mots (G2.17). Nous utilisons des émoticônes drôles pour les interfaces utilisateurs représentant un feedback (G3.3). Les émoticônes souriantes sont ajoutées aux feedbacks positifs et les émoticônes tristes sont ajoutées aux feedbacks négatifs (G2.17, G1.3, G1.4). Les interfaces utilisateurs sont multimodales (G2.15). Les modalités offertes sont la vision, l'audio et l'interaction tactile. Nous utilisons les figures pour faciliter la compréhension du contenu textuel. Le contenu de chaque interface est présenté en utilisant plusieurs supports multimédias : le texte, l'image et l'audio (G2.14, G6.7, G9.1, G9.2). Par exemple, nous avons recours à la métaphore de la clé pour l'interface utilisateur d'inscription, comme le montre la Figure 72.



Figure 72. Utilisation de la métaphore de la clé associée à l'interface utilisateur d'inscription.

Feedback et support : nous fournissons un feedback après chaque action de l'utilisateur (G1.1). Nous utilisons des messages courts (G1.2) et encourageants (G3.6) (par exemple : « Vous êtes un héros ! »). Nous assistons l'utilisateur durant sa navigation (G1.4). En effet, après le chargement de chaque interface utilisateur, un message vocal est automatiquement lancé. Par exemple, suite au chargement d'une interface affichant un quiz, un message vocal est associé pour lire la question posée et inviter l'utilisateur à saisir la réponse dans la zone de texte affichée. Les feedbacks sont cohérents (par exemple : nous associons un émoticône souriant à chaque feedback positif) (G1.3).

Navigation : le menu est statique (G7.1). Nous nous limitons à deux niveaux de profondeur (G2.42, G5.31). Les boutons sont de grande taille (G5.32). Nous nous limitons à 6 boutons (G2.45). Nous nommons ces boutons d'une manière non-ambiguë et facile à comprendre (G2.44). Le menu est ajouté à chaque interface (G1.7, G8.3). Nous fournissons le plan de notre prothèse de mémoire (G8.1). La couleur des hyperliens visités est déférente de ceux non visités (G1.8).

Personnalisation : les utilisateurs peuvent ajuster le volume de l'arrière-plan sonore selon leur choix (G6.10), l'arrêter (G6.8) et réécouter les messages auditifs (G6.9). Nous plaçons le bouton du réglage du volume à droite en bas (G6.15). Les utilisateurs peuvent également ajuster la taille du texte, comme le montre la figure suivante.



Figure 73. Interface utilisateur permettant d'ajuster la taille du texte.

Entrées : nous offrons la modalité de la reconnaissance vocale pour la saisie des données, tout en gardant l'alternative de la saisie en utilisant le clavier (G9.5, G9.7). Nous utilisons pour la saisie et la suppression des liens familiaux et conviviaux, les listes à choix multiples au lieu des champs de texte pour assister l'utilisateur (G4.1).

Hardware et interactions tactiles : le prototype de CAPTAIN MEMO est fondé sur un environnement J2EE. Par la suite, elle peut être utilisée à partir de n'importe quel appareil connecté à l'Internet. Cependant, nous encourageons l'utilisateur à éviter les appareils téléphoniques et à utiliser un ordinateur ou une tablette ayant un grand écran (G7.10, G5.38).

7.3.5. Intégration du prototype de notre approche DBE_ALZ

Nous intégrons le prototype de notre approche DBE_ALZ dans le prototype de CAPTAIN MEMO afin d'estimer la crédibilité de chaque donnée saisie par le malade d'Alzheimer ou un utilisateur de son entourage. Ces mesures sont stockées en tant que métadonnées dans la base de connaissances du patient qui est structurée selon l'ontologie MemoFuzzyOnto.

La première étape du module permettant l'estimation du caractère raisonnable de la donnée consiste à déterminer le patron de la donnée saisie. Dans le but de faciliter cette étape, nous avons recours à l'utilisation des listes déroulantes pour la saisie. La Figure 74 montre une interface utilisateur de CAPTAIN MEMO qui permet la saisie des différents liens familiaux et conviviaux.



Figure 74. Saisie des données en utilisant les listes déroulantes.

En nous fondant sur les métadonnées qui représentent les degrés de crédibilité générés avec l'approche DBE_ALZ, nous proposons un ensemble d'actions correctives permettant de garantir la qualité des services proposés par le prototype de CAPTAIN MEMO. (1) Nous affichons seulement les données ayant un degré de crédibilité supérieur à un certain seuil - actuellement paramétré à 0,7. (2) Si nous avons deux données contradictoires, seulement la donnée ayant un degré de crédibilité plus élevé est prise en compte.

7.4. Évaluations dans le cadre de CAPTAIN MEMO

Dans cette section, nous présentons quelques évaluations effectuées dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Premièrement, nous évaluons l'accessibilité de ses interfaces utilisateurs ainsi que le graphe de la famille et de l'entourage généré avec notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph. Deuxièmement, nous présentons l'évaluation du service Autobiographical Training. Troisièmement, nous évaluons notre approche DBE_ALZ. Ces trois évaluations font intervenir des personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer qui séjournent dans la maison de retraite de Sfax en Tunisie (rue Manzel-Chaker km. 8).

7.4.1. Évaluation de l'accessibilité de CAPTAIN MEMO et Memo Graph

La présente section vise à évaluer l'accessibilité des interfaces utilisateurs du prototype de CAPTAIN MEMO et la visualisation générée avec notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph dans le cadre de cette dernière.

Cette évaluation fait intervenir 24 personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer. Un questionnaire de sélection est élaboré pour sélectionner les participants à partir de leurs caractéristiques (âge, capacité visuelle, capacité auditive, niveau d'étude, sexe, stade de la maladie d'Alzheimer, etc.). Parmi les 24 participants, 5 participants sont atteints du stade avancé de cette maladie et tous les autres participants sont atteints du stade précoce ou modéré de cette maladie. Les participants sont 10 femmes et 14 hommes, âgés de 55 à 78 ans. La médiane est égale à 64 ans.

Un questionnaire de satisfaction est utilisé afin de relever le taux de satisfaction des participants. Ce questionnaire est composé de 18 questions d'accessibilité regroupées en 5 dimensions : « réaction globale », « visibilité », « reconnaissance vocale », « terminologie » et « arrière-plan sonore ». Les participants expriment leur accord ou leur désaccord sur une échelle de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord). Pour répondre au questionnaire, nous aidons chaque patient à manipuler quelques interfaces utilisateurs de notre prothèse de mémoire ainsi que le graphe familial généré à l'aide de Memo Graph pendant environ 20 minutes. Nous les aidons à effectuer quelques tâches à savoir la recherche via le graphe, le zoom du graphe, l'utilisation de la modalité de la reconnaissance vocale, etc. Le tableau suivant présente le questionnaire de satisfaction et les résultats de l'expérience.

Tableau 27. Résultats du questionnaire pour l'évaluation de l'accessibilité des interfaces utilisateurs du prototype de CAPTAIN MEMO et de la visualisation générée à l'aide de Memo Graph avec des malades d'Alzheimer.

Question	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	Moyenne
Réaction globale (La moyenne globale est égale à 4)						
En général, est-ce que l'interface est facile à utiliser ?		3	3	5	9	4
En général, est-il facile d'apprendre à utiliser l'interface?		7	3	10		3,15
En général, est-ce que l'interface est amusante à utiliser ?			1	3	16	4,75
En général, êtes-vous satisfait(e) de cette interface ?		3	3	3	11	4,1
Visibilité (La moyenne globale est égale à 4,75)						
Pouvez-vous lire le contenu textuel de l'interface ?		4		4	12	4,2
Par défaut, pouvez-vous lire les titres de l'interface ?				2	18	4,9
Est-ce que la possibilité d'ajuster la taille du texte est utile ?					20	5
Est-ce que les images sont assez grandes ?				2	18	4,9
Reconnaissance vocale (La moyenne globale est égale à 3,8)						
Est-ce que la modalité de la reconnaissance vocale est utile ?	5			4	11	3,8
Terminologie (La moyenne globale est égale à 4,72)						
Est-ce que les noms des commandes sont significatifs ?				2	18	4,9
Est-ce que les icônes utilisées sont faciles à comprendre ?			2	3	15	4,65
Est-ce que l'utilisation de l'étiquette textuelle facilite l'interprétation de l'icône ?					20	5
Est-ce que les messages d'erreur sont utiles ?		4	2	1	13	4,15
Est-ce que les messages informatifs sont précis ?				2	18	4,9
Arrière-plan sonore (La moyenne globale est égale à 3,825)						
Est-ce que vous êtes satisfait(e) du rythme de l'information auditive ?	6			10	4	3,3
Est-ce que les messages vocaux sont utiles ?	6	2			12	3,5
Est-ce que les interactions vocales sont utiles ?	6	2			12	3,5
Est-ce que la possibilité d'ajuster le volume est utile ?					20	5

4 participants refusent de répondre au questionnaire. Ils ne sont pas motivés pour utiliser les nouvelles technologies. Ces participants sont les plus vieux, atteints du stade avancé de la maladie d'Alzheimer et ne maîtrisent pas l'utilisation des ordinateurs et des technologies connexes. Nous appelons ces utilisateurs "patient-restricted users".

La moyenne générale des 5 dimensions est comprise entre 3,8 et 4,74. Ainsi, les résultats confirment bien que les interfaces utilisateurs de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO sont conviviales, faciles à utiliser et accessibles aux personnes touchées par la maladie d'Alzheimer.

25% des participants utilisent le clavier pour la saisie des données. Ils ne peuvent pas utiliser la modalité de la reconnaissance vocale, car leurs voix sont basses et ne peuvent pas être capturées par le microphone.

30% des participants ignorent l'arrière-plan sonore, car ils ne peuvent pas assimiler le contenu auditif. Ainsi, dans la prochaine itération, nous devons assurer un rythme plus lent pour délivrer le contenu auditif.

7.4.2. Évaluation de l'efficacité du service Autobiographical Training

La présente section vise à évaluer l'efficacité de notre service Autobiographical Training de CAPTAIN MEMO.

Cette évaluation fait intervenir 18 personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer $P = \{P_1, \dots, P_{18}\}$. $\{P_1, \dots, P_9\}$ sont atteints du stade précoce de la maladie d'Alzheimer (MMSE supérieur à 20). $\{P_{10}, \dots, P_{15}\}$ sont atteints du stade modéré de cette maladie (MMSE compris entre 10 et 20). Les autres participants sont atteints du stade avancé de cette maladie (MMSE inférieur à 10).

Chaque participant utilise Autobiographical Training pendant une heure cinq fois par semaine durant six semaines. Ils sont évalués à la fin de chaque séance en se basant sur le "Successful Score". Pour tous les participants, les moyennes hebdomadaires du "Successful Score" (en %) durant les six semaines sont présentées dans le Tableau 28.

Tableau 28. Évolution des moyennes hebdomadaires du "Successful Score".

	Baseline	Moyenne hebdomadaire des "Successful Score" (première semaine)	Moyenne hebdomadaire des "Successful Score" (seconde semaine)	Moyenne hebdomadaire des "Successful Score" (troisième semaine)	Moyenne hebdomadaire des "Successful Score" (quatrième semaine)	Moyenne hebdomadaire des "Successful Score" (cinquième semaine)	Moyenne hebdomadaire des "Successful Score" (sixième semaine)
Participants atteints du stade précoce de la maladie d'Alzheimer (MMSE supérieur à 20)							
P₁	65,95	66,98	67,25	67,96	68,25	69,25	70,36

P₂	61,42	62,65	62,95	64,28	63,85	64,13	65,95
P₃	62,15	64,28	64,81	65,71	66,66	67,5	67,96
P₄	64,28	65,71	65,71	68,57	68,81	69,12	70,97
P₅	58,46	60,12	60,76	61,61	62,31	63,38	64,82
P₆	73,12	75,34	75,89	76,66	77,5	78,89	80,25
P₇	56,90	57,98	58,69	58,78	60,58	59,78	62,95
P₈	87,52	88,65	89,45	90,78	90,68	91,25	92,78
P₉	55,20	56,25	56,78	57,25	57,98	58,69	60,25
Moyenne	65	66,44	66,92	67,95	68,51	69,11	70,69
Participants atteints du stade modéré de la maladie d'Alzheimer (MMSE compris entre 10 et 20)							
P₁₀	42,15	43,51	45,71	45,9	46,34	47,23	47,93
P₁₁	48,25	49,25	50,69	53,58	53,98	54,25	55,25
P₁₂	39,58	39,28	39,58	40,18	40,45	41,08	42,98
P₁₃	51,7	52,2	53,4	53,8	54,9	55,6	55,96
P₁₄	41,23	42,05	42,66	43,6	43,9	44,69	45,21
P₁₅	29,32	30,25	30,29	31,25	32,28	32,58	33,58
Moyenne	42,03	42,75	43,72	44,71	45,30	45,9	46,81
Participants atteints du stade avancé de la maladie d'Alzheimer (MMSE inférieur à 10)							
P₁₆	28,57	27,14	28,52	22,14	Hospitalisé		
P₁₇	16,10	16,36	16,18	16,36	16,89	16,98	16,95
P₁₈	13,25	13,48	13,78	14,36	14,86	15,69	15,96
Moyenne	14,67	14,92	14,98	15,36	15,87	16,33	16,45

Pour tous les participants, la moyenne globale des “Successful Scores” passe de 40,55% au début de l'évaluation à 46,65% à la fin de cette évaluation. Nous concluons qu'Autobiographical Training peut aider les patients atteints de la maladie d'Alzheimer à retenir certaines informations.

Pour les participants atteints du stade précoce de la maladie d'Alzheimer (MMSE supérieur à 20), la moyenne globale des “Successful Scores” passe d'une moyenne de 65% au début de l'évaluation à 70,69% à la fin de cette évaluation. Pour les participants atteints du stade modéré de cette maladie (MMSE compris entre 10 et 20), la moyenne globale des “Successful Scores” passe d'une moyenne de 42,03% au début de l'évaluation à 46,81% à la fin de cette évaluation. Pour les participants atteints du stade avancé de la maladie d'Alzheimer (MMSE inférieur à 10), la moyenne globale des “Successful Scores” passe d'une moyenne de 14,67% au début de l'évaluation à 16,45% à la fin de cette évaluation. Les participants atteints du stade précoce de la maladie d'Alzheimer tirent plus d'avantages de

notre thérapie non-pharmacologique par rapport à P₁₇ et P₁₈ qui sont atteints du stade avancé de cette maladie.

7.4.3. Évaluation de l'efficacité de notre approche DBE_ALZ

La présente section vise à **évaluer l'efficacité de notre approche DBE_ALZ**. Cette évaluation est effectuée dans le cadre de CAPTAIN MEMO. Nous avons recours aux **mesures du Rappel et de la Précision**.

Cette évaluation fait intervenir cinq personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4 \text{ et } P_5\}$ et leurs aidants associés $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4 \text{ et } C_5\}$. Les aidants choisis sont soit le fils soit la fille du patient. L'aidant C_i correspond au patient d'Alzheimer P_i . Parmi les cinq participants, deux participants sont atteints du stade modéré de la maladie d'Alzheimer (P_3 et P_5) et tous les autres participants sont atteints du stade précoce de cette maladie (P_1, P_2 et P_4). Les participants sont deux femmes et trois hommes, âgés de 65 à 71ans. La médiane est égale à 67 ans. Les scores MMSE sont compris entre 19 et 27. Nous excluons les participants présentant des troubles comportementaux manifestes, une aphasie sévère et des pertes auditives et/ou visuelles sévères.

Nous demandons aux malades d'Alzheimer de saisir quelques données dans le contexte de CAPTAIN MEMO. Nous demandons aux participants de saisir seulement leurs parents au premier degré (les enfants, son père et sa mère), leurs parents au second degré (ses petits-enfants, ses grands-parents, ses frères et ses sœurs), leurs conjoints, leurs oncles et leurs tantes.

Cette évaluation se base sur les trois scénarios suivant :

- **Le premier scénario** : il s'agit du scénario appelé « DBE_ALZ scénario ». Nous intégrons le prototype de l'approche DBE_ALZ dans prototype de CAPTAIN MEMO. Toutes les données saisies par le patient Alzheimer P_i ayant un degré de crédibilité supérieur à 0,7 sont sauvegardées dans une base de connaissances $KB_{i/s1}$ (la base de connaissances qui correspond aux données saisies par le patient P_i selon le premier scénario).
- **Le second scénario** : ce scénario est appelé « Golden standard scenario ». L'aidant C_i vérifie toutes les données saisies par le patient Alzheimer P_i . Seules les données vraies sont sauvegardées dans une base de connaissances $KB_{i/s2}$ (la base de connaissances qui correspond aux données saisies par le patient P_i selon le second scénario).

Nous utilisons les mesures d'évaluation suivantes :

- La mesure PR_i (la Précision associée aux données personnelles du patient P_i). Elle est définie par la formule suivante :

$$PR_i = |KB_{i/s1} \cap KB_{i/s2}| / |KB_{i/s1}|$$

- La mesure RA_i (le Rappel associé aux données personnelles du patient P_i). Elle est définie par la formule suivante :

$$RA_i = |KB_{i/s1} \cap KB_{i/s2}| / |KB_{i/s2}|$$

Le Tableau 29 résume les mesures de la Précision et du Rappel associées aux données relatives aux patients.

Tableau 29. Mesures de la Précision et du Rappel associées aux données personnelles des patients.

	Patient P ₁	Patient P ₂	Patient P ₃	Patient P ₄	Patient P ₅
Précision	PR ₁ = 0,77	PR ₂ = 0,93	PR ₃ = 0,92	PR ₄ = 0,94	PR ₅ = 0,93
Rappel	RA ₁ = 0,77	RA ₂ = 0,87	RA ₃ = 0,72	RA ₄ = 0,85	RA ₅ = 0,75

La moyenne des Précisions {PR₁, PR₂, PR₃, PR₄ et PR₅} est égale à 0,89. La moyenne des Rappels {RA₁, RA₂, RA₃, RA₄ et RA₅} est égale à 0,79.

7.5. Conclusion

La maladie d'Alzheimer provoque des troubles de la mémoire et plusieurs symptômes handicapants la vie quotidienne. Son évolution impose souvent une prise en charge par les proches du malade ou par des établissements spécialisés. À l'heure actuelle, l'accompagnement des malades d'Alzheimer repose sur une approche multidisciplinaire incluant les traitements médicamenteux et non-médicamenteux. À cet effet, nous proposons notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO qui se comporte comme **un aide-mémoire « intelligent » qui vise à aider les personnes atteintes de la maladie d'Alzheimer à pallier les problèmes mnésiques.**

Par rapport aux travaux connexes, **notre prothèse de mémoire offre des interfaces utilisateurs intelligentes qui sont fondées sur un traitement sémantique des données et s'adaptent aux besoins spécifiques des malades d'Alzheimer.**

Les données personnelles du propriétaire de la prothèse sont structurées selon notre ontologie MemoFuzzyOnto. Elle est temporelle, floue, multilingue et multiculturelle. Pour la modélisation des liens familiaux, nous utilisons l'ontologie PersonLink. Nous étendons cette dernière pour représenter les autres données personnelles du malade d'Alzheimer (par exemple : les liens conviviaux, les données extraites à partir de Facebook, etc.). Enfin, nous permettant à notre ontologie de modéliser et de raisonner sur intervalles temporels. Un moteur d'inférence formé par des règles précises et floues est associé.

Les interfaces utilisateurs de CAPTAIN MEMO sont accessibles à notre cible. Elles sont adaptées aux besoins spécifiques de ces utilisateurs particuliers, vocales, multimodales, amusantes et personnalisées. Nous nous basons sur notre méthodologie de conception InterfaceToAlz pour mettre en œuvre ces interfaces. La conception de ces derniers est basée sur notre guide de bonnes pratiques e d'ergonomie. Nous intégrons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph pour assurer l'accessibilité et la compréhensibilité du graphe de la famille et de l'entourage du patient.

CAPTAIN MEMO est tolérante à la saisie des données fausses. Nous intégrons à cette dernière le prototype de l'approche DBE_ALZ pour estimer le degré de crédibilité de chaque donnée saisie. Nous associons après deux actions correctives pour garantir la qualité des services.

Elle est tolérante à la saisie des intervalles temporels précis et imprécis. Nous intégrons dans MemoFuzzyOnto notre approche permettant de modéliser et de raisonner sur les intervalles temporels imprécis avec une vue floue et le travail de [Herradi et al., 2017] pour représenter et raisonner sur ceux qui sont précis

Elle est multilingue (anglais, français et arabe) et **multiculturelle**, grâce à l'utilisation de l'ontologie PersonLink.

Les interfaces utilisateurs du service Autobiographical Training sont adaptatives. Chaque patient a sa propre collection de questions proposées et de réponses liées à sa vie privée. Le niveau de difficulté des questions générées dépend de la progression de la maladie d'Alzheimer.

Le service MEMO_Calendring **génère automatiquement des données supplémentaires sur les événements planifiés et supporte la saisie en langage naturel.** Le service E-Diary exploite les données stockées et DBpedia pour générer des données supplémentaires.

L'évaluation du prototype sur quelques fonctionnalités fait intervenir des malades d'Alzheimer. Pour évaluer l'accessibilité, nous avons eu recours à la méthode d'évaluation la plus utilisée : le questionnaire. Vingt-quatre malades ont participé. Les résultats ont montré que ces interfaces sont conviviales et faciles à utiliser. Pour l'évaluation du service Autobiographical Training, dix-huit malades d'Alzheimer ont participé. Les résultats ont montré que notre stimulateur de mémoire aide ces participants à retenir certaines informations. Enfin, nous avons évalué notre approche DBE_ALZ. Cinq patients d'Alzheimer et leurs aidants ont participé. Les résultats ont été encourageants.

CHAPITRE 8 :

Conclusion et perspectives

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une prothèse de mémoire, appelée CAPTAIN MEMO, pour aider les malades d'Alzheimer à pallier les problèmes mnésiques. Elle offre des interfaces utilisateurs « **intelligentes** » **fondées sur un traitement sémantique des données, et qui s'adaptent au patient.**

8.1. Contributions

8.1.1. Sur le plan théorique

- **La méthodologie de conception InterfaceToAlz** qui définit un ensemble d'étapes (guide de bonnes pratiques d'ergonomie, conception et évaluation) à suivre par le designer pour concevoir des interfaces utilisateurs pour les malades d'Alzheimer. Elle est centrée utilisateur et itérative.
- **Un guide de 145 bonnes pratiques d'ergonomie** que les concepteurs pourront suivre pour concevoir des interfaces utilisateurs accessibles aux malades d'Alzheimer. Elles sont extraites à partir de 16 travaux de la littérature. Elles sont catégorisées selon les incapacités relatives à la maladie d'Alzheimer et au processus normal du vieillissement ainsi qu'un ensemble de critères d'ergonomie.
- **L'approche IKIEV** qui permet d'extraire et de visualiser, d'une façon incrémentale, le résumé de l'ABox de l'ontologie. Nous définissons trois mesures permettant de déterminer les instances-clés.
- **Une typologie de l'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO** par le malade d'Alzheimer ou un utilisateur de son entourage. Nous distinguons neuf types d'imperfections directes (l'incertitude, la confusion, l'erreur de saisie, la connaissance erronée, l'oubli, l'inconnaissance, l'imprécision, la circonlocution et l'inutilité) et trois types d'imperfections indirectes (l'incohérence, l'incomplétude et la redondance). Elle peut être généralisable à d'autres applications pour les malades d'Alzheimer.
- **Une méthode d'estimation qualitative et quantitative de la crédibilité des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO.** Nous nous basons sur notre méthode de l'estimation et de l'amélioration de la qualité des données. Premièrement, nous proposons un modèle de crédibilité qui se compose d'un

ensemble de dimensions pour évaluer qualitativement la crédibilité des données saisies. Deuxièmement, nous nous basons sur ce dernier pour proposer notre approche DBE_ALZ qui permet d'estimer quantitativement la crédibilité de chaque donnée saisie. Elle est basée sur le raisonnement incertain (les réseaux bayésiens) et le raisonnement approximatif (les systèmes d'inférence floue). Le degré de crédibilité généré est sauvegardé dans la base de connaissances du patient en tant que métadonnée. Notre modèle de crédibilité et notre approche DBE_ALZ peuvent être généralisables à d'autres applications pour les malades d'Alzheimer.

- Nous proposons **une première solution, basée sur une approche précise pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de l'ontologie**. Cette approche est basée sur un environnement totalement précis. Nous étendons l'approche 4D-fluents avec de nouveaux composants précis pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations temporelles qualitatives précises qui peuvent exister entre ces derniers dans le contexte d'une ontologie précise. Puis nous étendons l'algèbre d'Allen avec une vue précise. Nous proposons des relations temporelles précises permettant de comparer deux intervalles temporels imprécis. Ensuite, nous proposons pour chacune de ces relations, une règle SWRL.

Cette solution a l'avantage de pouvoir être implémentée avec des outils standards éprouvés.

- Nous proposons **une deuxième solution, fondée sur une approche floue pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de l'ontologie**. Cette approche est basée sur un environnement totalement flou. Nous étendons l'approche 4D-fluents avec de nouveaux composants flous pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations qualitatives floues qui peuvent exister entre ces derniers dans le contexte d'une ontologie floue. Puis nous étendons l'algèbre d'Allen pour proposer des relations temporelles floues, graduelles et personnalisées qui comparent deux intervalles temporels imprécis. La définition de ces dernières se base sur notre extension de l'algèbre des points de Vilain et Kautz qui proposent un ensemble de comparateurs flous, graduels et personnalisés. Ensuite, nous proposons pour chacune de ces relations, une règle IF-THEN de Mamdani.

Cette solution plus sophistiquée a l'avantage de pouvoir utiliser une graduation des relations temporelles qualitatives.

- Notre **ontologie MemoFuzzyOnto** qui représente les données personnelles du propriétaire de la prothèse. Cette ontologie est multilingue et multiculturelle, car elle est basée sur l'ontologie PersonLink qui permet la modélisation et le raisonnement sur les liens familiaux dans les trois langues : anglais, français et arabe. Elle est temporelle, car elle permet la modélisation et le raisonnement sur les intervalles temporels. Elle est floue, car elle implémente notre approche avec une vue pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels imprécis. Le moteur d'inférence associé est formé par des règles SWRL et des règles IF-THEN de Mamdani.

8.1.2. Sur le plan pratique

- **L'outil de visualisation d'ontologies Memo Graph** qui génère un graphe accessible aux malades d'Alzheimer. Il fait appel à notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie et à notre approche IKIEV. Memo Graph supporte aussi la visualisation des données ouvertes liées. Il peut être intégré dans d'autres applications pour les non-connaisseurs du domaine et utilisé en tant qu'application autonome par des experts du domaine. Il supporte aussi le passage à l'échelle ;
- Nous réalisons **un prototype de notre prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO**.
(1) Nous implémentons le service **Family/Entourage Show**. Nous intégrons notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph pour générer le graphe de la famille et de l'entourage du patient. (2) Nous implémentons le service **Autobiographical Training**. Il offre des interfaces utilisateurs adaptatives. Les questions générées sont basées sur la vie privée du malade. Il ajuste automatiquement le niveau de difficulté des questions en fonction de la progression de la maladie d'Alzheimer. (3) Nous implémentons le service **E-Diary**. Il génère des données supplémentaires sur les événements enregistrés en se basant sur les données stockées dans la base de connaissances du malade et le jeu de données ouvertes liées DBpedia. (4) Nous implémentons le service **MEMO_Calendring**. Ce service génère automatiquement des données supplémentaires sur les événements planifiés et il supporte les entrées en langage naturel. (5) Nous intégrons le prototype de notre approche DBE_ALZ dans le prototype de CAPTAIN MEMO pour estimer la crédibilité de chaque donnée saisie. Nous associons après deux actions correctives visant à garantir la qualité des services offerts. (6) Pour la mise en œuvre des interfaces utilisateurs de notre prototype, nous

nous basons sur notre méthodologie InterfaceToAlz. Nous concevons ces dernières en se basant sur notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie.

Plusieurs évaluations sont effectuées :

- Évaluation de l'utilisabilité et l'efficacité de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph avec des experts du domaine.
- Évaluation de l'accessibilité de la visualisation générée à l'aide de notre outil de visualisation d'ontologies Memo Graph dans le cadre de CAPTAIN MEMO avec des malades d'Alzheimer.
- Évaluation de l'efficacité du service Autobiographical Training avec des malades d'Alzheimer.
- Évaluation de l'accessibilité des interfaces utilisateurs de CAPTAIN MEMO avec des malades d'Alzheimer.
- Évaluation de notre approche DBE_ALZ dans le cadre de CAPTAIN MEMO avec des malades d'Alzheimer.

8.2. Perspectives

8.2.1. Sur le plan théorique

- **Prise en compte des autres types d'imperfection des données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO** : nous projeterons de prendre en compte des autres formes d'imperfection de notre typologie. Par exemple, il faudra prendre en compte l'imprécision liée aux données non temporelles comme « Pierre est le plus âgé que moi » et « Elaine fait partie de ma famille ».
- **Poursuite de notre travail sur la représentation et le raisonnement sur les intervalles temporels imprécis dans le cadre de l'ontologie** : dans un premier temps, nous projeterons de définir pour chacune de nos deux approches une table de composition entre les relations résultantes. En effet, nos relations temporelles conservent les propriétés des relations d'Allen (symétrie, transitivité et réflexivité). Dans un second temps, nous projeterons d'étendre nos approches pour représenter et raisonner sur les intervalles temporels à la fois imprécis et incertains. Comme déjà mentionnées, les données saisies dans le cadre de CAPTAIN MEMO sont incertaines. Dans un troisième temps, nous souhaiterons proposer une approche pour

l'interrogation des intervalles temporels imprécis et incertains dans le cadre de l'ontologie.

- **Interrogation de CAPTAIN MEMO en langage naturel** : la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO doit répondre aux questions posées en langage naturel par son propriétaire (par exemple : « Qui est la personne en face de moi ? », « Où habite Paul ? », « Ai-je pris mon médicament ? »). Les données personnelles du patient sont structurées selon l'ontologie MemoFuzzyOnto. Par la suite, l'interrogation de la prothèse de mémoire en langage naturel revient à interroger cette ontologie. Cependant, l'interrogation en langage naturel des ontologies temporelles, floues et/ou multilingues est encore un challenge. Nous envisageons de développer un outil d'interrogation d'ontologies en langage naturel que nous avons choisi de l'appeler MEMO_QR. Nous projeterons ensuite d'intégrer MEMO_QR dans CAPTAIN MEMO et évaluer la performance de cet outil avec les malades d'Alzheimer (qui ont la particularité d'utiliser un mot pour un autre, souvent proche par sonorité, etc.).

8.2.2. Sur le plan pratique

De nombreux autres modules pourront s'ajouter à notre prototype de la prothèse de mémoire CAPTAIN MEMO :

- **Service « Rappel des habitudes »** : comme son nom l'indique, ce service permet d'aider le malade d'Alzheimer de se rappeler de ses habitudes : listes des choses à prendre dans sa valise pour des déplacements, recettes de cuisine, idées de menus à réaliser, rappel des menus déjà réalisés, allergies, interdits ou dégoût pour certains aliments, habitudes vestimentaires (exemples de tenues selon les circonstances), etc. ;
- **Service « Retrouver des objets importants grâce à une étiquette RFID »** : les puces RFID sont disposées sur les objets essentiels comme un trousseau de clés, la télécommande, le portefeuille et les lunettes, et envoient en permanence un signal radio pour donner leurs coordonnées. En cas de recherche d'un objet, la tablette permettra d'afficher où se trouve l'objet et éventuellement de le montrer en image. La portée des puces est de plus en plus étendue et leur miniaturisation est déjà bien avancée.
- **Service « Aide aux déplacements »** : ce service est propre au système mobile. Il aide le patient à être autonome le plus possible. Il permet le guidage vers un itinéraire, le guidage vers un lieu ou une personne, le guidage vers le domicile, l'alerte sur la position actuelle, etc.

- **Intégration de la prothèse dans un système de réalité augmentée** de type google glasses pour superposer des éléments personnalisés issus de l'ontologie aux visages ou lieux croisés.

Un transfert de notre prototype vient de débuter auprès d'un ingénieur chargé d'en faire une version pre-industrielle.

Cette version a pour but de **transférer la validation** de notre prothèse de mémoire en France, sur une plus grande échelle, avec un protocole classique de dispositif médical, dans une comparaison avec d'autres dispositifs d'aide (deux établissements médicaux français sont déjà volontaires).

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [Arch et Abou-Zhara, 2008] A. Arch et S. Abou-Zhara, “How web accessibility guidelines apply to design for the ageing population”, Accessible Design in a Digital World Conference, 2008.
- [Al-Razgan et al., 2012] M. S. Al-Razgan, H. Al-Khalifa et H. Alajmi, “Touch-based mobile phone interface guidelines and design recommendations for elderly people: a survey of the literature”, In: International Conference on Neural Information Processing, pp. 568-574, 2012.
- [Abou-Zahra, 2012] S. Abou-Zahra, “How People with Disabilities Use the Web. Status: Draft Updated 1 August 2012”, 2012.
- [Allen, 1983] J. F. Allen, “Maintaining Knowledge about Temporal Intervals”, In: Commun. ACM, 26(11), pp. 832–843, 1983.
- [ADI, 2015] [En ligne] <https://www.alz.co.uk/sites/default/files/pdfs/world-alzheimer-report-2015-summary-sheet-french.pdf> (date du dernier accès: 03/04/2018)
- [Agence nationale de lutte Contre l'illettrisme, 2013] Agence Nationale de Lutte Contre l'Illettrisme, « L'évolution de l'illettrisme en France », 2013
- [Atlas mondial de données, 2018] [En ligne] <https://knoema.fr/atlas/topics/Éducation/Alphabétisation/Taux-dalphabétisation-des-adultes-âgés> (date du dernier accès: 03/04/2018)
- [Artale et Franconi, 2000] A. Artale, E. Franconi, “A survey of temporal extensions of description logics”, In: Ann. Math. Artif. Intell, 30(1-4), pp. 171–210, 2000.
- [Araujo et al., 2013] S. Araujo et al., “Experimenting with explorer: a direct manipulation generic RDF browser and querying tool”, In: Visual interfaces to the social and the semantic web, 2013.
- [Ancient et Good, 2013] C. Ancient, A. Good, “Issues with designing dementia-friendly interfaces”, In: HCI International, Las Vegas, Nevada, États-Unis, 2013.
- [Auer et al., 2010] S. Auer et al., “LESS- template-based syndication and presentation of Linked Data”, In: Extended Semantic Web Conference, p. 211–224, 2010.
- [Atemezing et Troncy, 2014] G. A. Atemezing et R. Troncy, “Towards a linked-data based visualization wizard”, In: International conference on consuming linked data-volume, pp.1-12, 2014.
- [Abu-Dalbouh et al., 2015] H. Abu-Dalbouh et al., “A mobile reminder system for elderly and Alzheimer's patients,” In: International Journal of Computer Science Issues, 12(5), pp. 95,

- 2015.
- [Ameta et al., 2015] D. Ameta, K. Mudaliar et P. Patel, “Medication reminder and healthcare – an android application”, In: International Journal of Managing Public Sector Information and Communication Technologies (IJMP ICT), 6(2), 2015.
- [Akoka et al., 2008] J. Akoka, L. Berti-Équille, O. Boucelma, M. Bouzeghoub, I. ComynWattiau, M. Cosquer, V. Goasdoué, Z. Kedad, S. Nugier, V. Peralta, et S. Sisaïd-Cherfi, « Évaluation de la qualité des systèmes multisources. Une approche par les patterns », In: Workshop on Data and Knowledge Quality, 2008.
- [Alonso-Ríos et al., 2009] D. Alonso-Ríos, A. Vázquez-García, E. Mosqueira-Rey et V. Moret-Bonillo, “Usability: A Critical Analysis and a Taxonomy”, In: International Journal of Human Computer Interaction, 26(1), pp. 53-74, 2009.
- [ANAES, 2003] ANAES, « Prise en charge non médicamenteuse de la maladie d`Alzheimer et des troubles apparentés », 2003. [En ligne] <http://www.centre-alzheimer-jeunes.fr/wp-content/uploads/2015/12/Recommandations-ANAES-2003-prise-en-charge-non-m%C3%A9dicamenteuse.pdf>
- [Aubin, 2012] C. Aubin, « Indicateurs de performance & Qualité des données: Vers une démarche industrielle dans un grand Hôpital Français ». In : Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers-GISEH, 2012.
- [Akremi et al., 2016] H. Akremi, S. Zghal, V. Jouhet et G. Diallo, « FONTO : Une nouvelle méthode de la fuzzification d’ontologies », In : Journées Francophone sur les Ontologies, 2016.
- [Association internationale d’Alzheimer, 2017] Association internationale d’Alzheimer, « Près de 57 mille Tunisiens touchés par l’Alzheimer », 2017.
<https://www.tunisienumerique.com/pres-de-57-mille-tunisiens-touche-par-lalzheimer/>
- [Alzheimer’s Disease International (ADI), 2015] [En ligne] <https://www.alz.co.uk/> data du dernier accès : 02/04/2018
- [Batini, 2006] C. Batini et M. Scannapieco, “Data Quality. Concepts, Methodologies and Techniques (Data-Centric Systems and Applications)”, Springer, New York, 2006.
- [Bayes, 1763] T. Bayes, “A letter from the late Reverend Mr. Thomas Bayes, FRS to John Canton”, In: Philosophical Transactions, pp. 269-271, 1763.

- [Batsakis et al., 2017]** S. Batsakis, E. G. Petrakis, I. Tachmazidis et G. Antoniou, “Temporal representation and reasoning in OWL 2”, In: *Semantic Web*, 8(6), pp.981-100, 2017.
- [Bouchon-Meunier, 1993]** B. Bouchon-Meunier, « La logique floue », 1993.
- [Bosca et al., 2006]** A. Bosca, D. Bonino et P. Pellegrino, “OntoSphere3D: A Multidimensional Visualization Tool for Ontologies”, In: *International Conference on Database and Expert Systems Applications*, 2006.
- [Bārzdīņš et al., 2010]** J. Bārzdīņš, G. Bārzdīņš, K. Čerāns, R. Liepiņš et A. Sproģis, “OWLGrEd: a UML Style Graphical Notation and Editor for OWL 2”, In: *OWL: Experiences and Directions Workshop*, 2010.
- [Bach et al., 2011]** B. Bach, P. Eietriga, I. Liccardi et G. Legostaev, “OntoTrix: A Hybrid Visualization for Populated Ontologies”, In: *International Conference Companion on World Wide Web*, 2011.
- [Bouchon-Meunier, 1995]** B. Bouchon-Meunier, « La logique floue et ses applications », 1995.
- [Barkat-Defradas, 2008]** M. Barkat-Defradas, M. Sophie, L. Rico-Duarte et D. Brouillet, « Les troubles du langage dans la maladie d’Alzheimer », In : *journée d’études sur la Parole*, 2008.
- [Ben Hassine, 2014]** S. Ben Hassine, « Évaluation et requêtage de données multisources : une approche guidée par la préférence et la qualité des données », Thèse de doctorat, 2014.
- [Berti-Equille, 2004]** L. Berti-Equille, « Un état de l’art sur la qualité des données », In : *Ingénierie des Systèmes d’Information*, 9(5-6), pp.117-143, 2004.
- [Bobillo et al., 2007]** F. Bobillo, M. Delgado et J. Gomez-Romero, “Optimizing the crisp ´ representation of the fuzzy description logic SROIQ”, In: *Workshop on Uncertainty Reasoning for the Semantic Web (URSW 2007)*, 2007.
- [Bobillo et Straccia, 2008]** F. Bobillo et U. Straccia, “fuzzyDL: An expressive fuzzy description logic reasoner”, In: *International Conference on Fuzzy Systems*, pp. 923–930, 2008.
- [Bobillo et Straccia, 2011]** F. Bobillo, U. Straccia, “Fuzzy ontology representation using OWL 2”, In: *Int. J. Approx. Reasoning*, 52(7), pp. 1073–1094, 2011.
- [Becker et Bizer, 2009]** C. Becker et C. Bizer, “Exploring the geospatial semantic web with DBpedia mobile”, In: *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide*

- Web, 7(4), pp. 278–286, 2009.
- [Berners-Lee et al., 2006]** T. Berners-Lee et al., “Tabulator: Exploring and analyzing Linked Data on the semantic web”. In: International Semantic Web User Interaction Workshop, 2006.
- [Brunetti et al., 2012]** J. Brunetti et al., “Facets and pivoting for flexible and usable linked data exploration”, Interacting with linked data workshop, Crete, Greece, 2012.
- [Berners-Lee et al., 2001]** T. Berners-lee, J. Hendler, O. Lassila, “The Semantic Web”, In: Scientific American, pp. 20-88, 2001.
- [Borst et Akkermans, 1997]** W. Borst, “Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse”, Thèse de doctorat, 1997.
- [Baget et al., 2004]** J. F. Baget, “Improving the Forward Chaining Algorithm for Conceptual Graphs Rules”, In: International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, pp. 407-414, 2004.
- [Brickley, 2004]** D. Brickley, “RDF vocabulary description language 1.0: RDF schema”, 2004.
- [Bechhofer et al., 2004]** S. Bechhofer, F. van Harmelen, J. Hendler et I. Horrocks, D. McGuinness, P. Patel-Schneider, L. Stein, « OWL Web Ontology Language Reference », W3C, 2004.
- [Brunetti et al., 2013]** J. M. Brunetti, S. Auer, R. García, J. Klímek et M. Nečaský, “Formal linked data visualization model”, In: International Conference on Information Integration and Web-based Applications & Services, 2013.
- [Bikakis et Sellis, 2016]** N. Bikakis, and T. Sellis, “Exploration and visualization in the web of big linked data: A survey of the state of the art”, 2016.
- [Bastien et Scapin, 1992]** J. M. C. Bastien et D. L. Scapin, “A validation of ergonomic criteria for the evaluation of human-computer interfaces”, In: International Journal of Human-Computer Interaction, 4(2), pp.183-196, 1992.
- [Baccino et al., 2005]** T. Baccino, C. Bellino et T. Colombi, « Mesure de l'utilisabilité des interfaces », Paris: Hermès Science publ, 2005.
- [Brooke, 1996]** J. Brooke, “SUS-A quick and dirty usability scale”, In: Usability evaluation in industry, 189(194), pp. 4-7, 1996.
- [Barkat-Defradas et al.,** M. Barkat-Defradas, S. Martin, L. Rico-Duarte et D. Brouillet, « Les troubles du langage dans la maladie d'Alzheimer », In : Journées d'études sur la Parole,

- 2008]** Avignon, 2008.
- [Burns et al., 1999]** A. Burns, B. Lawlor et S. Craig, “Assessment scales in old age psychiatry”, In: American Journal of Geriatric Psychiatry, 7(4), 1999.
- [Badaloni et Giacomini, 2006]** S. Badaloni, M. Giacomini, “The algebra IA^{fuz} : a framework for qualitative fuzzy temporal reasoning”, In: Artif. Intell, 170(10), pp. 872–908, 2006.
- [Caprani et al., 2012]** N. Caprani, “Touch screens for the older user. Assistive technologies”, In: InTech, pp. 95-118, 2012.
- [Catenazzi, 2013]** N. Catenazzi, et al., “User-friendly ontology editing and visualization tools: the OWLeasyViz approach”, In: International conference information visualisation, 2013.
- [Carrière et al., 1995]** J. Carrière et R. Kazman, “Interacting with Hugh Hierarchies: Beyond Cone Trees”, In: Information Visualization, pp. 74-81, 1995.
- [Chung et al., 2005]** M. Chung, S. Oh, K. Kim, H. Cho, H.K. Cho, “Visualizing and authoring OWL in ezOWL”, In: International Conference on Advanced Communication Technology, 2005.
- [Cozman, 2001]** F. Cozman, “The JavaBayes system”, In: The ISBA Bulletin, 7(4), pp.16-21, 2001.
- [Casta, 2009]** J. F. Casta, « Incertitude et comptabilité », 2009
- [Chilukoti et al., 2007]** N. Chilukoti, K. Early, S. Sandhu, C. Riley-Doucet et D. Debnath, “Assistive technology for promoting physical and mental exercise to delay progression of cognitive degeneration in patients with dementia”, In: IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, pp. 235-238, 2007.
- [Chilukoti, 2007]** N. Chilukoti, “Assistive Technology for Promoting Physical and Mental Exercise to Delay Progression of Cognitive Degeneration in Patients with Dementia”, In: Biomedical circuits and systems conference, pp. 235-238, 2007.
- [Cingolani et Alcalá-Fdez, 2012]** P. Cingolani et J. Alcalá-Fdez, “jFuzzyLogic: A Robust and Flexible Fuzzy-Logic Inference System Language Implementation”, In: International Conference on Fuzzy Systems, pp. 1-8, 2012.
- [Charlet et al., 2005]** J. Charlet, B. Bachimont et R. Troncy, « Le Web sémantique », In : La revue Information - Interaction - Intelligence, pp. 7-20, 2005.

Références bibliographiques

- [Cowell, 1999]** R. G. Cowell, A. P. Dawid, S. L. Lauritzen, et D. J. Spiegelhalter, “Probabilistic Networks and Expert Systems”, pp. 1524-1524, 1999.
- [Cummings, 2005]** J. L. Cummings, “Behavioral and neuropsychiatric outcomes in Alzheimer's disease”, In: International Journal of Neuropsychiatric Medicine, pp. 22-27, 2005.
- [Dorenlot, 2006]** P. Dorenlot, « Démence et interventions non médicamenteuses : revue critique, bilan et perspectives », In : Non pharmacological interventions in dementia : a review and prospect, Psychologie et NeuroPsychiatrie du Vieillessement, pp. 135-144, 2006.
- [Duckham et al., 2001]** M. Duckham, K. Mason, J. Stell et M. A. Worboys, “Formal Approach to Imperfection in Geographic Information”, In: Computers, Environment and Urban Systems, 25(1), pp. 89-103, 2001.
- [Dubois et al., 2009]** B. Dubois, G. Picard et M. Sarazin, “Early detection of Alzheimer's disease: new diagnostic criteria”, In : Dialogues Clin Neurosci, 11(2), pp. 135-139, 2009.
- [De Amicis et Batini, 2004]** F. De Amicis et C. Batini, “A Methodology for Data Quality Assessment on Financial Data”, In: Studies in Communication Sciences, 4(2), pp115-136, 2004.
- [Djellal et Boufaïda, 2014]** D. Asma et B. Zizette, “Fuzzy Ontology Evolution: Classification of a New Individual”, In: Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence, 6(1), pp. 9-14, 2014.
- [De Runz, 2011]** C. De Runz, « Imperfection, temps et espace : modélisation, analyse et visualisation dans un SIG archéologique », rapport de thèse, 2011.
- [Diallo, 2016]** P. F. Diallo, « Aspects Socioculturels et Temporels dans les Ontologies pour les Communautés Virtuelles », Thèse de doctorat, 2016.
- [Daemen et al., , 2007]** E. Daemen et al., “Designing a free style, indirect, and interactive storytelling application for people with aphasia”, In: Human-Computer Interaction, pp. 221-234, 2007.
- [Darvishy et Good, 2013]** A. Darvishy et A. Good, “Inclusive websites for the elderly: user friendly guidelines for designers and managers of websites and applications”, In: International Conference on Human-Computer Interaction, pp. 226-230, 2013.
- [de Santana et al., 2012]** V. F. de Santana, R. de Oliveira, L. D. A. Almeida et M. C. C. Baranauskas,

- “Web accessibility and people with dyslexia: a survey on techniques and guidelines”, In: International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility, 2012.
- [Desjardin et al., 2012]** E. Desjardin, O. Nocent et C. de Runz, « Prise en compte de l'imperfection des connaissances depuis la saisie des données jusqu'à la restitution 3D », In : Actes des 2èmes Journées d'Informatique et Archéologie de Paris – JIAP 2010, pp. 385-396, 2012.
- [De Runz, 2008]** C. De Runz, « Imperfection, temps et espace : modélisation, analyse et visualisation dans un SIG archéologique », Thèse de doctorat, 2008.
- [Dubois et Prade 1989]** D. Dubois, H. Prade, “Processing fuzzy temporal knowledge”. In: IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 19(4), pp. 729–744, 1989.
- [De Boer, 2008]** De Boer J., “Auditory navigation for persons with mild dementia”, Mémoire, Faculté des sciences du comportement, Université de Twente, Enschede, 2008.
- [De Vocht, 2014]** L. De Vocht, et al., “A visual exploration workflow as enabler for the exploitation of linked open data. Workshop intelligent exploration of semantic data”, In: International Conference on Intelligent Exploration of Semantic Data, 2014.
- [Dadzie et Rowe, 2011]** A. S. Dadzie et M. Rowe, “Approaches to visualising linked data: A survey”, In Semantic Web, 1(1-2), 2011.
- [Dempster, 1968]** A. P. Dempster, “A generalization of Bayesian inference”, In: Journal of the Royal Statistical Society, pp. 205-247, 1968.
- [Dillon et Morris, 1999]** A. Dillon et M. Morris, “Power, Perception and Performance: From Usability Engineering to Technology Acceptance with the P3 Model of User Response”. In: Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 43(19), pp. 1017-1021, 1999.
- [English, 1999]** L. P. English, “Improving data warehouse and business information quality: methods for reducing costs and increasing profits”, In: J. Wiley & Sons, 1999.
- [Eklund et al., 2002]** P. Eklund, R. Nataliya, S. Green, “OntoRama: Browsing RDF Ontologies Using a Hyperbolic-Style Browser”, In: International Symposium on Cyber Worlds, 2002.
- [Ezzedine et al., 2012]** H. Ezzedine, A. Trabelsi, C. Tran et C. Kolski, « Critères et méthodes d'évaluation des systèmes interactifs Application à un poste de régulation dans

Références bibliographiques

- le domaine des transports », In : Ingénierie du transport et des services de mobilité avancés, pp. 213-293, 2012.
- [Freksa, 1992]** C. Freksa, “Temporal Reasoning Based on Semi-Intervals”, In: Artif. Intell, 54(1), pp. 199–227, 1992.
- [Fisher et al., 2005]** P.F. Fisher, A. Comber et R. Wadsworth, « Nature de l’incertitude pour les données spatiales » In : Qualité de l’information géographique, Paris : Hermès et Lavoisier, pp. 49-64, 2005.
- [Fisher, 2003]** Fisher, P.F. Models of uncertainty in spatial data. In : Geographical information systems, pp. 191-203, 2003.
- [Farage et al., 2012]** M. A. Farage, K. W. Miller, F. Ajayi et D. Hutchins, “Design principles to accommodate older adults”, Global journal of health science, vol. 4, pp. 2, 2012.
- [Friedman et Bryan, 2012]** M. G. Friedman et D. Nelson Bryen, “Web accessibility design recommendations for people with cognitive disabilities”, In: Technology and Disability, pp. 205-212, 2012.
- [Fridman et al., 2000]** N. Fridman, R. W. Ferguson, M. A. Musen, “The knowledge model of Protege-2000: Combining interoperability and flexibility”, In: International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management, Springer, pp. 17-32, 2000.
- [Falconer, 2009]** S. M. Falconer, C. Callendar et M.A. Storey, “FLEXVIZ: visualizing biomedical ontologies on the web”, In: International Conference on Biomedical Ontology, 2009.
- [Folstein et McHugh, 1975]** M. F. Folstein, S. E. Folstein et P. R. McHugh, “Mini mental state: a practical method for grading the cognitive state of patients for clinician”, In: Journal of Psychiatry Research, pp. 189- 198, 1975.
- [Fellegi et Sunter, 1969]** I. P. Fellegi et A. B. Sunter, “A theory for record linkage”. In: Journal of the American Statistical Association, 64(328), pp. 1183-1210, 1969.
- [Gammoudi et al., 2017]** A. Gammoudi, A. Hadjali, B. B. Yaghlane, “Fuzz-TIME: an intelligent system for managing fuzzy temporal information”, In: Int. J. Intelligent Computing and Cybernetics, 10(2), pp. 200–222, 2017.

- [Ghorbel et al., 2018]** F. Ghorbel, F. Hamdi, E. Métais, N. Ellouze et F. Gargouri, “A Fuzzy-Based Approach for Representing and Reasoning on Imprecise Time Intervals in Fuzzy-OWL 2 Ontology”, In: International Conference on Natural Language & Information Systems, pp.12, Paris, France, 2018.
- [Métais et al., 2018]** E. Métais, F. Ghorbel, F. Hamdi, N. Ellouze, N. Herradi et A. Soukane, “Representing Imprecise Time Intervals in OWL 2”, In: Enterprise Modelling and Information Systems Architectures -International Journal of Conceptual Modeling, pp. 120-132, 2018.
- [Ghorbel et al., 2017a]** Ghorbel, F. Hamdi, N. Ellouze, E. Métais et F. Gargouri, “Visualizing Large-scale Linked Data with Memo Graph”, In: International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering System, pp.10, Marseille, France, 2017.
- [Ghorbel et al., 2017b]** F. Ghorbel, E. Métais, N. Ellouze, F. Hamdi et F. Gargouri, “Towards Accessibility Guidelines of Interaction and User Interface Design for Alzheimer’s Disease Patients”, In: International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, pp.7, Nice, France, 2017.
- [Ghorbel et al., 2017c]** F. Ghorbel, N. Ellouze, E. Métais, F. Hamdi et F. Gargouri, “MEMO_Calendring: a Smart Reminder for Alzheimer’s Disease Patients”, In: International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities, pp.6, Sfax, Tunisie, 2017.
- [Ghorbel et al., 2016a]** F. Ghorbel, E. Métais, N. Ellouze et F. Gargouri, « Un outil de visualisation d’ontologies pour le web des données, utilisable par tous », In : Ingénierie des systèmes d’information, 21(5-6/2016), pp. 107-132, 2016.
- [Ghorbel et al., 2016b]** F. Ghorbel, N. Ellouze, E. Métais, F. Hamdi, F. Gargouri et N. Herradi, “MEMO GRAPH: An Ontology Visualization Tool for Everyone”, In: International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, 96(2016), pp.265-274, York, UK, 2016.
- [Ghorbel et al., 2016c]** F. Ghorbel, N. Ellouze, E. Métais, F. Gargouri, F. Hamdi et N. Herradi, “Designing and Evaluating Interfaces for the CAPTAIN MEMO Memory Prosthesis”, In: International Conference on Advances in Computer-Human Interactions, pp.6, Venise, Italie, 2016.
- [Guesgen et al., 1994]** H. W. Guesgen, J. Hertzberg et A. Philpott, “Towards implementing fuzzy Allen relations”, In: Proceedings of the ECAI-94 Workshop on Spatial and Temporal Reasoning, pp. 49–55, 1994.

- [Graves, 2013]** A. Graves, “Creation of visualizations based on linked data. International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics”, In: International Conference on Web Intelligence, Mining and Semantics, New York, USA, 2013.
- [Gowans et al., 2007]** G. Gowans et al., “Designing the interface between dementia patients, caregivers and computer-based intervention”, In: Design journal, 10(1), pp. 12-23, 2007.
- [Gruber, 1993]** T. Gruber, “A translation approach to portable ontology specifications”, In: Knowledge Acquisition Journal, 5(2), Academic Press, pp. 199-220, 1993.
- [Gavignet, 2017]** É. Gavignet, É. Leclercq, N. Cullot et M. Savonnet, « Raisonner en logique modale sur l’incertitude liée aux données : application en archéologie », In : Revue Internationale de Géomatique, 26(4), pp. 467-490, 2017.
- [Gruber, 2008]** T. R. Gruber, “Ontology. Proc. of the Encyclopedia of Database Systems”, 2008.
- [Gao et Liu, 2005]** M. Gao et C. Liu, “Extending OWL by Fuzzy Description Logic”, In: International Conference on Tools with Artificial Intelligence, pp. 562–567. Hong Kong, China, 2005.
- [Ghorbel H. et al., 2013]** H. Ghorbel, S. Maalej et R. Bouaziz, « Un framework pour la génération semi-automatique d’ontologies floues : Text2FuzzyOnto », Technique et Science Informatiques, 32(6/2013), pp. 671–699, 2013.
- [Guillaume et Charnomordic, 2013]** S. Guillaume et B. Charnomordic, « Systèmes d’inférence floue : collaboration expertise et données dans un environnement de modélisation intégrée à l’aide de FisPro », In : Revue d’intelligence artificielle, 1(26), 2013.
- [Guo et Chan, 2010]** S. S. Guo, C. Chan, “A tool for ontology visualization in 3D graphics: Onto3DViz”, In: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2010.
- [Gavignet, 2016]** É. Gavignet, É. Leclercq, N. Cullot, et M. Savonnet, « Raisonner en logique modale sur l’incertitude liée aux données-Application en archéologie », In : Revue Internationale de Géomatique, 26(4), pp. 467-490, 2016.
- [Haarslev et al., 2009]** V. Haarslev, H. I. Pai et N. Shiri, “Optimizing tableau reasoning in ALC extended with uncertainty”, In: International Workshop on Description Logics (DL-2007), pp. 307– 314, 2007.

- [Hastrup et al., 2008]** T. Hastrup et al., “Browsing Linked Data with Fenfire”, In: Linked Data on the Web Workshop, 2008.
- [Hunter et al., 2007]** A. Hunter et al., “An evolvable computer interface for elderly users”, In: Conference on Workshop Supporting Human Memory with Interactive Systems, Lancaster, UK, 2007.
- [Hong, 2006]** T. Hong, “Contributing Factors to the Use of Health-related Websites”, In: Journal of health communication, 11(2), pp. 149-165, 2006.
- [Herradi et al., 2015a]** N. Herradi, F. Hamdi, F. Ghorbel, E. Métais, N. Ellouze et A. Soukane, “Dealing with Family Relationships in Linked Data”, In: IWICM 2015, pp.5, 2015.
- [Herradi et al., 2015b]** N. Herradi, F. Hamdi, E. Métais, F. Ghorbel et A. Soukane, “PersonLink: An Ontology Representing Family relationships for the CAPTAIN MEMO Memory Prosthesis”, In: ER 2015 (Workshop AHA), pp.3-13, Stockholm, Suède, 2015.
- [Herradi et al., 2017]** N. Herradi, F. Hamdi et E. Métais, “A Semantic Representation of Time Intervals in OWL2”, In: KEOD, pp.1-8, Madeira, Portugal, 2017.
- [Hertzum, 2010]** M. Hertzum, “Images of Usability”, In: International Journal of Human-Computer Interaction, 26(6), pp. 567-600, 2010.
- [Harith, 2003]** A. Harith, “TGVizTab: An Ontology Visualisation Extension for Protégé”, In: Knowledge Capture, 2003.
- [Hop et al., 2012]** W. Hop, S. De Ridder et F. Hogenboom, “Using hierarchical edge bundles to visualize complex ontologies in glow”, In: Annual ACM Symposium on Applied Computing, 2012.
- [Hussain et al., 2014]** A. Hussain, K. Latif, A. Tariq Rextin, A. Hayat et M. Alam, “Scalable Visualization of Semantic Nets using Power-Law Graph”, In: Applied Mathematics and Information Sciences, 2014.
- [Habiballa, 2006]** H. Habiballa, “Fuzzy Predicate Logic Generalized Resolution Deductive System”, Rapport technique, 2006.
- [Imbeault et al., 2010]** H. Imbeault, N. Bier, H. Pigot, L. Gagnon, N. Marcotte, T. Fulop et S. Giroux, “Development of a personalized electronic organizer for persons with Alzheimer's disease: the AP@Iz”, In: Gerontechnology, 9(2), pp. 293, 2010.

- [Iglesias et Lehmann, 2011]** J. Iglesias et J. Lehmann, “Towards integrating fuzzy logic capabilities into an ontology-based inductive logic programming framework”. In: International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, pp. 1323-1328, 2011.
- [IJsselsteijn et al., 2007]** W. IJsselsteijn, H. H.Nap, Y. de Kort, et K. Poels, “Digital game design for elderly users”, In: Conference on future play, pp. 17-22, 2007.
- [Jian et al., 2011]** C. Jian et al., “Towards effective, efficient and elderly-friendly multimodal interaction”, In: International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, pp. 45, 2011.
- [Jian, 2013]** C. Jian, “Multimodal shared-control interaction for mobile robots in AAL environments”, Thèse de doctorat, Université de Brême, 2013.
- [Jean et al., 2007]** S. Jean, G. Pierra, Y. Ait-Ameur, “Domain Ontologies: a Database-Oriented Analysis”, In: Web Information Systems and Technologies, Springer, pp.238-254, 2007.
- [Katifori et Halatsis, 2007]** A. Katifori et C. Halatsis, “Ontology Visualization Methods—A Survey”, In: ACM Computing Surveys, 39(4), 2007.
- [Kirakowski et Corbett, 1993]** J. Kirakowski et M. Corbett, “SUMI: The software usability measurement inventory”, In: British journal of educational technology, 24(3), pp. 210-212, 1993.
- [Kirakowski et al., 1998]** J. Kirakowski, N. Claridge et R. Whitehand, “Human centered measures of success in web site design”, In: Conference on Human Factors & the Web, 1998.
- [Kallen-Cantegreil, 2005]** I. Kallen-Cantegreil, « La Prise en charge des personnes âgées atteintes de la maladie d’Alzheimer et de leurs aidants : les interventions médico-psycho-sociales et psychothérapeutiques », Thèse de Doctorat. Paris 8, 2005.
- [Krasner et Pope, 1988]** G. Krasner, S. Pope, “A Description of the Model-View-Controller User Interface Paradigm in the Smalltalk-80 System”, In: Journal of Object-Oriented Programming, 1(3), pp. 26-49, 1988.
- [Kaur et Kaur, 2012]** T. Kaur et A. Kaur, “Extension of a crisp ontology to fuzzy ontology”, In: International Journal Of Computational Engineering Research, pp. 201-207, 2012.
- [Kane et Galbraith, 2013]** S. K. Kane et C. Galbraith, “Design guidelines for creating voting technology

- for adults with aphasia”, 2013.
- [Krivov et al., 2007]** S. Krivov, R. Williams, F. Villa, “GrOWL: A tool for visualization and editing of OWL ontologies”, In: *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 2007.
- [Kriglstein et Wallner, 2010]** S. Kriglstein et G. Wallner, “Knocks - A Visualization Approach for OWL Lite Ontologies”, In: *Complex, Intelligent and Software Intensive Systems*, 2010.
- [Klein et Fensel, 2001]**, M. C. Klein et D. Fensel, “Ontology versioning on the Semantic Web”, In: *International Conference on Semantic Web and Web Services*, pp. 75-91, 2001.
- [Kahn et al., 2002]** B. K. Kahn, R. Y. Wang et Y. W. Lee, D. M. Strong, “AIMQ: A methodology for information. Information Management”, pp. 133–460, 2002.
- [Konstantopoulos et Apostolikas, 2007]** S. Konstantopoulos et G. Apostolikas, “Fuzzy-DL reasoning over unknown fuzzy degrees”, In: *International Workshop on Semantic Web and Web Semantics (SWWS 07)*, 2007.
- [Klímek et al., 2014]** J. Klímek, J. Helmich, M. Necaský, “Application of the linked data visualization model on real world data from the czech LOD cloud”, In: *Linked Data on the Web*, 2014.
- [Lorenz et al., 2007]** A. Lorenz et al., “Personalized mobile health monitoring for elderly”, In: *MobileHCI07*, Singapour, 2007.
- [Lee et al., 2009]** J. Lee, H. Chae, C. Kim et K. Kim, “Design of product ontology architecture for collaborative enterprises”, In: *Expert Systems with Applications*, pp. 2300–2309, 2009.
- [Lohmann et al., 2016b]** M. Weise, S. Lohmann et F. Haag, “LD-VOWL: Extracting and Visualizing Schema Information for Linked Data”, In: *Visualization and Interaction for Ontologies and Linked Data*, 2016.
- [Lewis, 1995]** J. R. Lewis, “IBM computer usability satisfaction questionnaires: psychometric evaluation and instructions for use”, In: *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(1), pp. 57-78, 1995.
- [Lopez et al., 2003]** O. L. Lopez, J. T. Becker, R. A. Sweet, W. Klunk, D. I. Kaufer, J. Saxton, M. Habeych et S. T. DeKosky, “Psychiatric symptoms vary with the severity of dementia in probable Alzheimer’s disease”, In: *Journal of neuropsychiatry and*

clinical neurosciences, pp. 346-353, 2003.

- [Lapre, 2010]** E. Lapre, *Maladie D’Alzheimer et thérapies non médicamenteuses : évaluation de la stimulation cognitive et de l’activité physique sur le fonctionnement exécutif*, Bordeaux 2, thèse de doctorat, 2010.
- [Lohmann et al., 2016]** S. Lohmann, S. Negru, F. Haag et T. Ertl, “Visualizing ontologies with VOWL”, In: *Semantic Web*, 7(4), pp. 399-419, 2016.
- [Lohmann et al., 2014]** S. Lohmann, S. Negru, F. Haag et T. Ertl, “VOWL 2: User-Oriented Visualization of Ontologies”, In: *Knowledge Engineering and Knowledge Management*, 2014.
- [Lv et al., 2010]** Z. Lv, F. Xia, G. Wu, L. Yao et Z.Chen, “ iCare: a mobile health monitoring system for the elderly”, In: *Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber*, pp. 699-705, 2010.
- [Loshin, 2004]** D. Loshin, “Enterprise Knowledge Management – The Data Quality Approach”, In: *Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems*, USA, 2004.
- [Lee, 2002]** Y. Lee, D. Strong, B. Kahn et R. Wang, “AIMQ: A methodology for information quality assessment”, In: *Information & management*, 40(2), pp. 133-146, 2002.
- [Lee et al., 2006]** Y. W. Lee, L. L. Pipino, J. F. Fund et R. Y. Wang, “Journey to Data Quality”, The MIT Press, Cambridge, MA, 2006.
- [Livingston et al., 2017]** The Lancet International Commission on Dementia Prevention and Care
- [Loureiro et Rodrigues, 2014]** B. Loureiro et R. Rodrigues, “Design guidelines and design recommendations of multi-touch interfaces for elders”, In: *International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, pp. 41-47, 2014.
- [Liebig et Noppens, 2004]** T. Liebig, O. Noppens, “OntoTrack: A Semantic Approach for Ontology Authoring”, In: *International Semantic Web Conference*, 2004.
- [Motta et al., 2011]** S. Peroni, E. Motta et M. Aquin, “Identifying Key Concepts in an Ontology, through the Integration of Cognitive Principles with Statistical and Topological Measures”, In: *Semantic Web*, Springer, pp. 242–256, Bangkok, Thailand, 2008.
- [Mamdani et Assilian, 1975]** An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *Int. J.*

- Man-machine Studies, Vol. 7, 1–13, 1975.
- [Macedo-Rouet et al., 2008]** M. Macedo-Rouet, J. F. Rouet, V. Zampa et E. Bouin, « L’information Internet : le jugement de crédibilité des usagers », 2008.
- [Meiland et al., 2007]** F. J. M. Meiland, et al., “COGKNOW: development and evaluation of an ICT-device for people with mild dementia”, In: Journal on information technology in healthcare, pp. 166-177, 2007.
- [Makedon et al., 2010]** F. Makedon, et al., “An Interactive User Interface System for Alzheimer’s Intervention”, In: International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, 2010.
- [Morand, 1994]** B. Morand, « Processus de conception des Systèmes d’Information avec un modèle d’acteurs. Essai sur le système de représentation », Thèse de doctorat en informatique, Université de Caen, 244 pages, 1994.
- [Muylle et al., 1999]** S. Muylle, R. Monaert et M. Despontin, “Introducing website user satisfaction: an integration of a qualitative pilot study with related mis research”, In: 28th EMAC, 1999.
- [Millet, 2009]** X. Millet, « Capacités cognitives résiduelles et facteurs d’optimisation des performances de mémoire dans la maladie d’Alzheimer ». Thèse de Psychologie, Université Bordeaux 2, 123 pages, 2009.
- [Makedon et al., 2010]** F. Makedon et al., “An Interactive User Interface System for Alzheimer’s Intervention”, In: International conference on PErvasive technologies related to assistive environments, 2010.
- [Magnier et al., 2015]** C. Magnier, C. Fage, K. Etchegoyhen, C. Consel et H. Sauzeon, « Utilisation de la conception centrée utilisateur dans les applications pour les enfants avec troubles du spectre autistique Vers des outils d’inclusion en classe ordinaire », In : Colloque des Jeunes Chercheurs en Sciences Cognitives, 2015.
- [McBride, 2001]** B. McBride, “Jena: Implementing the rdf model and syntax specification”. In: International Conference on Semantic Web-Volume 40, pp. 23-28, 2001.
- [Moosavizadeh et al., 2012]** S. Mohammad, H. Moosavizadeha, M. Mohsenzadeha et N. Arshadi, “A new approach to measure believability dimension of data quality”, In: Management Science Letters, 2(7), pp. 2565-2570, 2012.
- [Mazzieri, 2004]** M. Mazzieri, “A fuzzy RDF Semantics to represent trust Metat-Data”, In: Workshop on Semantic Web Application and Perspectives, pp. 83–89, 2004.

Références bibliographiques

- [Maâlej et al., 2010]** S. Maâlej, H. Ghorbel, A. Bahri et R. Bouaziz, « Construction des composants ontologiques flous à partir de corpus de données sémantiques floues », In : Inforsid, pp. 361–376. Marseille, France, 2010.
- [Miller et Fellbaum, 1998]** G. Miller et C. Fellbaum, “WordNet: An Electronic Lexical Database”, 1998.
- [Moutinho, 2011]** R. J. A. Moutinho, “A mobile phone navigator for older adults and persons with dementia”, Mastère en informatique, 2011.
- [Métais et al., 2015]** E. Métais, F. Ghorbel, N. Herradi, F. Hamdi, N. Lammari, D. Nakache, N. Ellouze, F. Gargouri et A. Soukane, “Memory Prosthesis”, In : Non-pharmacological Therapies in Dementia, 3(2), pp. 177-180, 2015.
- [Métais et al., 2016]** E. Métais, F. Hamdi, N. Lammari, D. Nakache, F. Ghorbel, N. Ellouze, N. Herradi et A. Soukane, « Vers un système d’information personnel pour l’aide à la dégénérescence de mémoire », In : Ingénierie et management des systèmes d’information, pp. 227-241, 2016.
- [Miller et Bevly, 2013]** J. Miller et D.M Bevly, “A system for autonomous canine guidance”, In: International Journal of Modelling, Identification and Control, 20(1) pp.33-46, 2013.
- [Naumann, 2002]** F. Naumann, “Quality-Driven Query Answering for Integrated Information Systems”, Springer, 2002.
- [Niels et al., 2013]** H. Niels, F. Truyen et E. Duval, “Designing with dementia: guidelines for participatory design together with persons with dementia”, In: IFIP Conference on Human-Computer Interaction, pp. 649-666, 2013.
- [Nagypál et Motik, 2003]** G. Nagypál et B.Motik, “A Fuzzy Model for Representing Uncertain, Subjective, and Vague Temporal Knowledge in Ontologies”, In: OTM Confederated International Conferences, Springer, pp. 906–923, 2003.
- [Noy et Rector, 2006]** N. Noy et A. Rector, “Defining N-ary Relations on the Semantic Web”. W3C Note. W3C.
<http://www.w3.org/TR/2006/NOTEswebp-n-aryRelations-20060412/>
- [Nielsen, 1994]** J. Nielsen, “Card sorting: How many users to test”, 2004.
- [Niskanen, 1989]** V. A. Niskanen, “Introduction to imprecise reasoning, uncertainty, decision making and knowledge engineering”, 1989.

- [Orchard, 2001]** R. Orchard, “Fuzzy Reasoning in JESS: The Fuzzyj Toolkit and Fuzzyjess”, In ICEIS, pp. 533-542, 2001.
- [Ostrowski et Mietkiewicz, 2015]** M. Ostrowski et M. Mietkiewicz, « La nuit du malade Alzheimer : le cauchemar de l’aidant conjoint à travers les guides pour les proches », In : Gériatrie et psychologie neuropsychiatrie du vieillissement, 13(2), pp.1179-186, 2015.
- [Olteanu et al., 2006]** A. M. Olteanu, et al., « L’apport de données spatiales pour une base de données ethnographique » , In : Actes de Conférence SAGEO, 2006.
- [Ohlbach, 2004]** H. J. Ohlbach, “Relations Between Fuzzy Time Intervals”. In: Symposium on Temporal Representation and Reasoning, IEEE Computer Society, pp. 44–51, 2004.
- [Olazarán et al., 2010]** J. Olazarán, et al., “Nonpharmacological Therapies in Alzheimer’s disease: A Systematic Review of Efficacy”, In: Dementia and geriatric cognitive disorders, 30(2), pp. 161-178, 2010.
- [Peroni et al., 2008]** S. Peroni, E. Motta, M. Aquin, “Identifying Key Concepts in an Ontology, through the Integration of Cognitive Principles with Statistical and Topological Measures”, In: Semantic Web, pp. 242–256, Springer, Bangkok, Thailand, 2008.
- [Pipino, 2002]** L. L. Pipino, Y. W. Lee et R. Y. Wang, “Data Quality Assessment”, In: Communications of the ACM, 45(4), pp. 211-218, 2002.
- [Pleckaityte, 2010]** M. Pleckaityte, “Alzheimers disease: A molecular mechanism, new hypotheses and therapeutic strategies”, In: Medicina (Kaunas), 46(1), pp. 70-76, 2010.
- [Prince et al., 2015]** M. Prince, A. Wimo, M. Guerchet, G. C. Ali, Y. T. Wu et M. Prina. “World Alzheimer Report 2015”, 2015.
<http://www.alz.co.uk/research/WorldAlzheimerReport2015.pdf>
- [Pawlak, 1982]** Z. Pawlak, “Rough sets”, In: International Journal of Computer and Information Sciences, 11(5), pp. 341-356, 1982.
- [Prat et Madnick, 2008]** N. Prat et S. Madnick, “Measuring Data Believability: A Provenance Approach”, In: Hawaii International Conference on System Sciences, page 393, Los Alamitos, CA, USA, 2008.

- [Plaisant et al., 2002]** C. Plaisant, J. Grosjean et B. B. Bederson, “Spacetree: Supporting exploration in large node link tree, design evolution and empirical evaluation”, In: *Craft of Information Visualization*, pp. 287-294, 2003.
- [Pipino et al., 2002]** L. Pipino, Y. Lee et R. Wang, “Data Quality Assessment”, In: *Communications of the ACM*, pp.211–218, 2002.
- [Pearl, 1988]** J Pearl, “Probabilistic reasoning in intelligent systems”, 1988.
- [Prat et Madnick, 2007]** N. Prat et S. Madnick, “Measuring Data Believability: a Provenance Approach”, In: *Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 393-393, 2007.
- [Phaneuf et Bal-Craquin, 2007]** M. Phaneuf et M. T. Bal-Craquin, « La maladie d'Alzheimer et la prise en charge infirmière », Elsevier Masson, 2007.
- [Phiriyapokanon, 2011]** T. Phiriyapokanon, “Is a big button interface enough for elderly users? toward user interface guidelines for elderly users”, Mémoire, université de Mälardalen, 2011.
- [Pai, 2015]** A. Pai, Samsung releases Backup Memory app for Alzheimer’s patients, 2015.
<http://www.mobihealthnews.com/43023/samsung-releases-backup-memory-app-for-alzheimers-patients>
- [Quan et al., 2004]** T. T. Quan, S. C. Hui et T. H. Cao, “FOGA: A fuzzy ontology generation framework for scholarly semantic web”, In: *Knowledge Discovery and Ontologies Workshop*, Pisa, Italy, 2004.
- [Rajarathnam, 2007]** S. Rajarathnam, “Use of personal digital assistants (PDAs) by individuals with acquired brain injury: Does it improve their adaptive function?”, Alliant International University, San Diego, 167 pages, 2007.
- [Rodriguez, 2010]** C. G. Rodriguez, « Qualité des données capteurs pour les systèmes de surveillance de phénomènes environnementaux », thèse de doctorat, 2010.
- [Rialle, 2007]** V. Rialle, « Technologies nouvelles susceptibles d’améliorer les pratiques gérontologiques et la vie quotidienne des malades âgés et de leur famille », rapport : Ministère de la santé et des solidarités, 2007.
- [Rodríguez et al., 2014]** N. D. Rodríguez, M. P. Cuéllar, J. Lilius et M. D. Calvo-Flores, “A fuzzy ontology for semantic modelling and recognition of human behavior”, In: *Knowledge-Based Systems*, pp. 46-60, 2014.

- [Rello et al., 2012]** L. Rello, G. Kanvinde et R. Baeza-Yates, “Layout guidelines for web text and a web service to improve accessibility for dyslexics”, In: International Cross-Disciplinary Conference on Web Accessibility, 2012.
- [Ranwez et al., 2012]** V. Ranwez, S. Ranwez et S. Janaqi, « Extraction de sous-ontologies autonomes par fermeture des opérateurs hyponymie et hyperonymie », In : Revue des Sciences et Technologies de l’Information-Série TSI: Technique et Science Informatiques, 31(1), pp. 11-38, 2012.
- [Redman, 1997]** T. C. Redman, “Data Quality of the Information Age”, 1997.
- [Riley-Doucet et Debnath, 2007]** C. Riley-Doucet et D. Debnath, “Assistive technology for promoting physical and mental exercise to delay progression of cognitive degeneration in patients with dementia”, In: IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference, pp. 235-238, 2007.
- [Ramaroson et al., 2003]** H. Ramaroson, C. Helmer, P. Barberger-Gateau, L. Letenneur et J.F. Dartigues, “Prevalence of dementia and Alzheimer's disease among subjects aged 75 years or over: updated results of the PAQUID cohort”, In: Revue neurologique, 159(4), pp. 405-411, 2003.
- [Seux et al., 2008]** M. L. Seux, J. De Rotrou et A. S. Rigaud, « Les traitements de la maladie d’Alzheimer », In : Psychiatrie, sciences humaines, neurosciences, pp. 82-90. 2008.
- [Scannapieco, 2004]** M. Scannapieco, A. Virgillito, C. Marchetti, M. Mecella et R. Baldoni, “The DaQuinCIS Architecture: A Platform for Exchanging and Improving Data Quality in Cooperative Information Systems”, In: Information Systems, 29(7), pp. 551-582, 2004.
- [Sanchez et al., 2006]** E. Sanchez et T. Yamanoi, “Fuzzy Ontologies for the Semantic Web”, In: International Conference on Flexible Query Answering Systems, pp. 691–699, Milan, Italy, 2006.
- [Stoilos et Stamou, 2010]** G. Stoilos, G. Stamou et J. Z. Pan, “Fuzzy extensions of OWL: Logical properties and reduction to fuzzy description logics”, In: International Journal of Approximate Reasoning, 51(6), pp. 656-679, 2010.
- [Seeman et Cooper, 2015]** L. Seeman et M. Cooper, “Cognitive Accessibility User Research”, 2015. [En ligne] <http://w3c.github.io/coga/user-research/> (date du dernier accès: 05/11/2017).

- [Storey et al., 2001] M. A. Storey, M. Musen, J. Silva, C. Best, N. Ernst, R. Fergerson et R. Noy, “Jambalaya: Interactive visualization to enhance ontology authoring and knowledge acquisition in Protégé”, In: Workshop on Interactive Tools for Knowledge Capture, 2001.
- [Singh et al., 2006] G. Singh, T.V. Prabhakar, J. Chatterjee, V.C. Patil, S. Ninomiya, “OntoViz: Visualizing Ontologies and Thesauri Using Layout Algorithms”, In: International Conference of the Asian Federation for Information Technology in Agriculture, 2006.
- [Sabri, 2013] L. Sabri, « Modèles sémantiques, raisonnements réactifs et narratifs, pour la gestion du contexte en intelligence ambiante et en robotique ubiquitaire », Thèse de doctorat, 2013.
- [Smets, 1997] P. Smets, “Imperfect Information: Imprecision-Uncertainty en Uncertainty Management in Information Systems: from Needs to Solutions”, pp. 225-254, 1997.
- [Smets, 1998] P. Smets, “Numerical Representation of Uncertainty”, In: Belief change, Springer, pp. 265-309, 1998.
- [Straccia et Visco, 2008] U. Straccia et G. Visco, “DL-Media: an ontology mediated multimedia information retrieval system”, In: Description Logics, 2008.
- [Straccia, 2009] U. Straccia, “A Minimal Deductive System for General Fuzzy RDF”, In: International Conference on Web Reasoning and Rule Systems, Springer, pp. 166-181, 2009.
- [Stoilos et al., 2006] G. Stoilos, N. Simou, G. Stamou et S. Kollias, “Uncertainty and the semantic web”, In: IEEE Intelligent Systems, 21(5), pp. 84-87, 2006.
- [Schockaert et Cock, 2008] S. Schockaert et M. D. Cock, “Temporal reasoning about fuzzy intervals”, In: Artificial Intelligence, 172(8), pp. 1158-1193, 2008.
- [Sirin et al., 2007] E. Sirin, B. Parsia, B. C. Grau, A. Kalyanpur et Y. Katz, “Pellet: A practical OWL-DL reasoner”, In: Web Semantic, 5(2), pp. 51-53, 2007.
- [Skjæveland, 2012] M. G. Skjæveland, “Sgvizler: A javascript wrapper for easy visualization of sparql result sets”, In: Extended Semantic Web Conference, 2012.
- [Sarne-Fleischmann, 2013] V. Sarne-Fleischmann, “Computer-Supported Personal Interventions for Elderly People with Cognitive Impairment and Dementia”, Thèse de doctorat, 2013.

Références bibliographiques

- [**Shafer, 1976**] G. Shafer, “A mathematical theory of evidence”, In: Princeton University Press, 1976.
- [**Shackel, 1984**] B. Shackel, “The concept of usability. Visual display terminals: Usability issues and health concerns”, pp. 45-87, 1984.
- [**Shneiderman et al., 2009**] B. Shneiderman, C. Plaisant, M. Cohen et S. Jacobs, “Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction”, 2009.
- [**Tulving, 1995**] E. Tulving, “Organisation of memory : quo vadis ?”, In: cognitive neurosciences, pp 839-847. 1995.
- [**Takagi et Sugeno, 1985**] T. Takagi et M. Sugeno, “Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control”, In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 15(1), 116-132, 1985.
- [**Taowei et Parsia, 2006**] D. W. Taowei, T. Parsia, “CropCircles: Topology Sensitive Visualization of OWL Class Hierarchies” In: International Conference on Semantic Web, 2006.
- [**Tsatsou et al., 2014**] D. Tsatsou, S. Dasiopoulou, I. Kompatsiaris et V. Mezaris, “LiFR: A Lightweight Fuzzy DL Reasoner”, In: European Semantic Web Conference, pp. 263-267, Springer, 2014.
- [**Togelius et al., 2013**] J. Togelius et al., “Assessing believability”, In: Believable bots, Springer, 2013.
- [**Thomas et al., 2007**] E. Thomas, J. Z. Pan et D. H. Sleeman, “ONTOSEARCH2: Searching Ontologies Semantically”, In: Experiences and Directions Workshop, 2007.
- [**Troullinou et al., 2017**] G. Troullinou, H. Kondylakis, E. Daskalaki et D. Plexousakis, “Ontology understanding without tears: The summarization approach”, In: Semantic Web, pp. 797-815, 2017.
- [**Valsecchi et al., 2015**] F. Valsecchi, M. Abrate, C. Bacciu, M. Tesconi et A. Marchetti, “Linked Data Maps: Providing a Visual Entry Point for the Exploration of Datasets”, In IESD@ ISWC, 2015.
- [**Vidal et al., 2012**] A. Vidal, F. Bou et L. Godo, “An SMT-based solver for continuous t-norm based logics”, Scalable Uncertainty Management, Springer, pp. 633-640, 2012.
- [**Vilain et Kautz, 1986**] M. B. Vilain et H. A. Kautz, “Constraint Propagation Algorithms for Temporal Reasoning”, In: National Conference on Artificial Intelligence, pp. 377–382,

- 1986.
- [Wang, 2010]** W. Y. Wang et al., “Wedjat: a mobile phone based medication reminder and monitor”, In: International Conference on Bioinformatics and Bioengineering, 2009.
- [Watts et al., 2009]** S. Watts, G. Shankaranarayanan et A. Even, “Data quality assessment in context: A cognitive perspective”, In: Decision Support Systems, 48(1), pp. 202-211, 2009.
- [W. Y. Wang et al., 2009]** W. Y. Wang et al., “Wedjat: a Mobile Phone Based Medication Reminder and Monitor,” In: International Conference on Bioinformatics and Bioengineering, 2009.
- [Weenect, 2017]** Weenect, « Comment aider les personnes âgées à utiliser les nouvelles technologies ? », 2017. [En ligne] <https://www.weenect.com/blog/fr/2017/02/23/comment-aider-les-personnes-agees-utiliser-les-nouvelles-technologies/>
- [Williams et al., 2013]** D. Williams, M. Arif Ul Alam , S. Iqbal Ahamed et W. Chu, “Considerations in designing human-computer interfaces for elderly people”, In: International Conference on Quality Software, pp. 372-377, 2013.
- [Welty et Fikes, 2006]** C. Welty et R. Fikes, “A Reusable Ontology for Fluents in OWL”, In: Frontiers in Artificial Intelligence and Applications, pp. 226–236, 2006.
- [Wang et Strong, 1996]** R. Wang et D. Strong, “Beyond accuracy: what data quality means to data consumers”, In: Journal of Management Information Systems, 12(4), pp. 5–33, 1996.
- [Wang et al., 2009]** H. Wang, Z. M. Ma et J. Yin, “Fresg: A kind of fuzzy description logic reasoner”, In: International Conference on Database and Expert Systems Applications, pp. 443–450, 2009.
- [Xia et al., 2010]** Z. Lv, F. Xia, G. Wu, L. Yao et Z.Chen, “iCare: a mobile health monitoring system for the elderly”, In: Conference on Green Computing and Communications & Int'l Conference on Cyber, pp. 699-705, 2010.
- [Yu et al., 2009]** F. Yu et al., “Cognitive Training for Early-Stage Alzheimer’s Disease and Dementia”, In: Journal of gerontological nursing, pp. 23-29, 35(3), 2009.
- [Yaguinuma et Reformat, 2013]** C. A. Yaguinuma, M. T. Santos, H. A. Camargo et M. Reformat, “A FML-based Hybrid Reasoner Combining Fuzzy Ontology and Mamdani Inference”,

Références bibliographiques

- In: IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 1-8, 2013.
- [Zoghlami, 2013]** A. Zoghlami, « Modélisation et conception de systèmes d'information géographique gérant l'imprécision », Thèse de doctorat, 2013.
- [Zadeh, 1975]** L. A. Zadeh, "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning", In: Inf. Sci., 8(4), pp. 301–357, 1975.
- [Zmily et Abu-Saymeh, 2013]** A. Zmily et D. Abu-Saymeh, "Alzheimer's disease rehabilitation using smartphones to improve patients' quality of life", In: Pervasive Computing Technologies for Healthcare, pp. 393-396, 2013.
- [Zhang et al., 2007]** X. Zhang, G. Cheng et Y. Qu, "Ontology Summarization Based on RDF Sentence Graph", In: International Conference on World Wide Web, pp. 707-716, 2007.
- [Zadeh, 1965]** L.A. Zadeh, "Fuzzy sets. Information and Control", p. 338-353, 1965.

Fatma GHORBEL

Dialogue graphique intelligent, fondé sur une ontologie, pour une prothèse de mémoire

Résumé

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons une prothèse de mémoire « intelligente », appelée CAPTAIN MEMO, destinée aux malades d'Alzheimer, pour pallier leurs problèmes mnésiques. Cette prothèse est basée sur l'ontologie temporelle, floue et multilingue appelée MemoFuzzyOnto.

Cette prothèse offre des interfaces accessibles à cette classe particulière d'utilisateurs. Nous proposons, pour mettre en œuvre ces interfaces, une méthodologie de conception appelée InterfaceToAlz pour concevoir des interfaces accessibles aux malades d'Alzheimer, et qui offre un guide de 145 bonnes pratiques d'ergonomie.

De plus, nous proposons un outil de visualisation d'ontologies appelé Memo Graph qui génère un graphe dont la visualisation et la manipulation sont accessibles aux malades d'Alzheimer. Cette proposition est motivée par le fait que CAPTAIN MEMO a besoin de générer et d'éditer le graphe de la famille et de l'entourage du patient, à partir de l'ontologie MemoFuzzyOnto qui structure sa base de connaissances. Memo Graph est fondé sur notre guide de bonnes pratiques d'ergonomie et notre approche, appelée Incremental Key-Instances Extraction and Visualisation, qui permet une extraction et une visualisation incrémentale du résumé des assertions ABox de l'ontologie. Il supporte également la visualisation des données ouvertes liées (Linked Data) et le passage à l'échelle.

Par ailleurs, nous proposons, dans le cadre de cette thèse, une typologie de l'imperfection des données saisies (principalement due à la discordance mnésique provoquée par la maladie), et une méthodologie pour permettre à CAPTAIN MEMO d'être tolérante à la saisie des données fausses. Nous proposons un modèle d'évaluation de la crédibilité et une approche, nommée Data Believability Estimation for Applications to Alzheimer Patients, permettant d'estimer qualitativement et quantitativement la crédibilité de chaque donnée saisie.

Enfin, pour que CAPTAIN MEMO soit tolérante à la saisie des intervalles temporels imprécis, nous proposons deux approches : l'une basée sur un environnement précis et l'autre basée sur un environnement flou. Dans chacune des deux approches, nous étendons l'approche 4D-fluents pour représenter les intervalles temporels imprécis et les relations temporelles qualitatives, puis nous étendons l'algèbre d'Allen pour prendre en compte les intervalles imprécis dans le cadre de notre ontologie MemoFuzzyOnto.

Nos contributions sont implémentées et évaluées. Nous avons évalué l'accessibilité de ses interfaces utilisateurs, le service de CAPTAIN MEMO qui a pour but de stimuler la mémoire du patient, notre approche pour l'estimation quantitative de la crédibilité des données saisies ainsi que la visualisation du graphe générée à l'aide de Memo Graph. Nous avons également évalué la performance de Memo Graph et son utilisabilité par des experts du domaine.

Mots-clés : Alzheimer, Prothèse de mémoire, Accessibilité, Interface utilisateur, Ontologie, Web sémantique, Visualisation de l'ontologie, Imperfection des données, Crédibilité des données, Intervalle de temps imprécis.

Abstract

In the context of this thesis, we propose a "smart" memory prosthesis, called CAPTAIN MEMO, to help Alzheimer's disease patients to palliate mnemonic problems. It is based on a temporal, fuzzy and multilingual ontology named MemoFuzzyOnto.

It provides accessible user interfaces to this demographic. To design these interfaces, we propose a methodology named InterfaceToAlz which serves as an information base for guiding and evaluating the design of user interfaces for Alzheimer's disease patients. It identifies 145 design guidelines.

Besides, we propose an ontology visualization tool called Memo Graph which offers an accessible and understandable visualization to Alzheimer's disease patients. In fact, in the context of CAPTAIN MEMO, there is a need to generate the patient entourage/family tree from its personal data structured according to MemoFuzzyOnto. Memo Graph is based on our design guidelines and our approach, named Incremental Key-Instances Extraction and Visualisation, to extract and visualize descriptive instance summarizations from a given ontology and generate "summary instance graphs" from the most important data. It supports Linked Data visualization and scaling.

Furthermore, we propose a typology of the imperfection of the data entered (mainly due to the memory discordance caused by this disease), and a methodology to allow false data entry. We propose a believability model and an approach called Data Believability Estimation for Applications to Alzheimer Patients to estimate qualitatively and quantitatively the believability of each data entered.

Finally, CAPTAIN MEMO allows imprecise time intervals entry. We propose two approaches: a crisp-based approach and a fuzzy-based approach. The first one uses only crisp standards and tools and is modeled in OWL 2. The second approach is based on fuzzy sets theory and fuzzy tools and is modeled in Fuzzy-OWL 2. For the two approaches, we extend the 4D-fluents model to represent imprecise time intervals and qualitative interval relations. Then, we extend the Allen's interval algebra to compare imprecise time interval in the context of MemoFuzzyOnto.

Our contributions are implemented and evaluated. We evaluated the service of CAPTAIN MEMO which has the aim to stimulate the patient's memory, the accessibility of its user interfaces, the efficiency of our approach to estimate quantitatively the believability of each data entered and the visualization generated with Memo Graph. We also evaluated Memo Graph with domain expert users.

Keywords: Alzheimer, Memory prosthesis, Accessibility, User interface, Ontology, Semantic Web, Ontology visualization, Data imperfection, Data believability, Imprecise time interval.