Approche co-évolutive humain-système pour l'exploration de bases de données

Hiary Landy Rajaonarivo

▶ **To cite this version:**

Hiary Landy Rajaonarivo. Approche co-évolutive humain-système pour l'exploration de bases de données. Recherche d'information [cs.IR]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2018. Français. NNT : 2018BRES0114 . tel-02077086

HAL Id: tel-02077086

https://theses.hal.science/tel-02077086

Submitted on 22 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE / MATHSTIC

ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE BRETAGNE

THESE DE DOCTORAT DE

L'ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE BREST

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 601
Mathématiques et Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication
Spécialité : *Informatique*

Par

« Hiary Landy RAJAONARIVO »

« Approche co-évolutive humain-système pour l'exploration de bases de données »

Thèse présentée et soutenue à Plouzané le 29/06/2018
Unité de recherche : Lab-STICC, UMR CNRS 6285

Rapporteurs avant soutenance :

Catherine FARON ZUCKER, Maître de conférences HDR, Université de Nice Sophia Antipolis
Arnaud REVEL, Professeur des Universités, Université de la Rochelle/L3I

Composition du Jury :

Président :	Thierry DUVAL	Professeur, IMT ATLANTIQUE, Plouzané
Examinateurs :	Salima HASSAS	Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1/LIRIS
	Patrick REIGNIER	Professeur des Universités, Université Grenoble-Alpes, ENSIMAG/LIG
	Eric MAISEL	Maître de conférences, ENIB Plouzané
	Catherine FARON ZUCKER	Maître de conférences HDR, Université de Nice Sophia Antipolis
Dir. de thèse :	Pierre DE LOOR	Professeur des Universités, ENIB, Plouzané

Remerciements

Je tiens à remercier Madame Catherine Faron Zucker, Maître de conférences HDR à l'Université Nice Sophia Antipolis et Monsieur Arnaud Revel, Professeur à l'Université de La Rochelle d'avoir accepté de rapporter ce mémoire et de faire partie des membres du jury. Je leurs en suis reconnaissante pour la pertinence de leurs remarques et la qualité d'analyses qu'ils ont apportées sur mes travaux de thèse en plus de suggestions constructives visant à perfectionner le travail.

Mes remerciements s'adressent également à Monsieur Thierry Duval , Professeur à l'Institut Mines-Télécom (IMT) Atlantique, à Madame Salima Hassas, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon, et à Monsieur Patrick Reignier, Professeur à l'Université Grenoble- Alpes d'avoir accepté de faire partie des membres du jury.

Je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Monsieur Pierre De Loor, Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB) pour sa réelle implication au suivi de l'avancement de ce travail malgré ses responsabilités diverses. Son encadrement sans failles, ses encouragements, ses attentions, ses précieux conseils, ses remarques constructives, ses aides et son accompagnent tout au long de la réalisation de cette thèse m'ont permis de mener à bien et à terme ma thèse.

Toute ma gratitude à mon co-encadrant, Monsieur Eric Maisel, Maître de conférences à l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB). A part la qualité du suivi de l'avancement de ce travail, il m'a accordé une bonne partie de son temps, et s'est toujours rendu disponible pour l'intérêt de ma recherche. La qualité de son encadrement, ses remarques pertinentes, ses conseils avisés, ainsi que ses différentes contributions pour l'amélioration de ce travail m'ont été d'une aide précieuse.

J'ai vraiment apprécié les moments de travail que j'ai eu avec vous. Vous avez donné

votre temps et m'avez apporté spontanément votre aide pour la réussite de cette thèse. Tout cela m'a encouragé et m'a permis de toujours avancer. Je vous en suis reconnaissante.

Cette thèse, s'inscrivant dans le cadre du projet ANTIMOINE ou ANThropologie des territoires et lecture du patrIMOINE. Je tiens à remercier l'Agence National de la Recherche (ANR) d'avoir financé ce projet ainsi que tous les membres du projet pour leur collaboration.

Je tiens à remercier Monsieur Jean Luc Flohic, Directeur de la société TOPIC-TOPOS d'avoir financé mes travaux de recherche pendant les 18 premiers mois de ma thèse et aussi de m'avoir partagé ses connaissances sur l'anthropologie, ainsi que pour l'accord d'utilisation de leurs données durant la réalisation de cette thèse.

Je souhaite remercier Monsieur Matthieu Courgeon qui a travaillé en tant que Post-Doctorant sur le projet ANTIMOINE. Je le remercie sincèrement pour sa contribution lors du développement des interfaces d'exploration de données, ainsi que pour les conseils en termes de recherche. Ce travail a été évalué grâce en partie à son aide.

J'adresse également mes remerciements à Madame Nicole Bouteiller, Secrétaire du laboratoire CERV/ENIB, pour son assistance pour les procédures administratives, ainsi que pour les déplacements qui m'ont permis de renforcer mes connaissances et mes compétences professionnelles.

J'aimerais remercier mes collègues de travail de m'avoir accueilli parmi eux, d'avoir partagé des connaissances avec moi et des différents événements.

Je présente mes vifs remerciement à Joanna, qui a rendu ces trois années de thèse sympathiques et chaleureux.

Spéciale dédicace à mes amis des quatre coins du monde qui m'ont encouragé, épaulé, écoulé et conseillé tout au long de cette thèse malgré la distance. Je voudrais exprimer également ma reconnaissance envers ceux qui sont venus assister à ma soutenance.

Enfin, ces remerciements ne seraient pas complets sans mentionner ma famille, spécialement à mes parents qui ont toujours cru en moi et m'ont poussé à aller plus loin afin d'atteindre mon objectif. Ma réussite est en grande partie grâce à eux, c'est pourquoi je leur dédie cette thèse.

Table des matières

I Introduction et État de l'art

1 INTRODUCTION GENERALE 2

1.1 Contexte 2

1.2 Positionnement 3

1.3 Organisation du mémoire 7

2 ETAT DE L'ART 8

2.1 Visualisation de données 9

2.1.1 Visualisation de données de structures ordonnées 10

2.1.2 Visualisation de données spatio-temporelles 13

2.1.3 Visualisation de données hiérarchiques 16

2.1.4 Visualisation de données multi-dimensionnelles 19

2.1.5 Synthèse sur les approches de visualisation 21

2.2 Recommandation de données 23

2.2.1 Approches basées sur un modèle de données 25

2.2.2 Approches basées sur un modèle utilisateur 26

2.2.3 Approches hybrides 30

2.2.4 Synthèse sur les approches de recommandation 38

2.3 Adaptabilité du système à l'utilisateur 39

2.4 Conclusion 50

II Proposition et Évaluation

3 PROPOSITION 52

3.1 Quelques approches sur l'exploration de données patrimoniales 56

3.2 Principes généraux de l'approche proposée 58

3.3 Description des données disponibles 60

3.3.1 Structures sémantiques 60

3.3.2 Base de données 62

3.3.3 Trace d'interaction 63

3.4 Définition du profil utilisateur 64

3.4.1 Style de navigation 64

3.4.2 Centres d'intérêt 64

3.5 Recommandation de données 69

3.5.1 Recommandation de concepts 69

3.5.2 Échantillonnage de données 70

3.6 Incarnation de données 72

3.6.1 Choix de l'environnement virtuel 3D 72

3.6.2 Éléments constitutifs de l'environnement virtuel 3D 73

3.6.3 Expansion progressive de l'environnement virtuel 3D 74

3.6.4 Auto-organisation des informations 76

3.7 Conclusion 77

4 IMPLEMENTATION 79

4.1 Application dans le cadre du projet ANTIMOINE 79

4.1.1 Données à disposition 80

4.1.2 Métaphore du musée virtuel vivant 81

4.1.3 Éléments constitutifs du musée 83

4.1.4 Types d'interactions 86

4.1.5 Applications implémentées 87

4.1.6 Architecture logicielle 87

4.1.7 Exemple de scénario d'exploration 89

4.2 Application à d'autres types d'interfaces 89

4.2.1 Interface 2D 89

4.2.2 Interface immersive 91

4.3 Application à un autre domaine 93

4.4 Conclusion 94

5 EXPERIMENTATION 96
5.1 Première expérimentation : Exp_A 97
5.1.1 Hypothèses d'évaluation 97
5.1.2 Participants 99
5.1.3 Description de l'expérimentation 99
5.1.4 Résultats de l'expérimentation 100
5.1.5 Discussion 102
5.2 Deuxième expérimentation : Exp_B 105
5.2.1 Hypothèses d'évaluation 106
5.2.2 Participants 107
5.2.3 Description de l'expérimentation 108
5.2.4 Résultats de l'expérimentation 109
5.2.5 Discussion 120
5.3 Conclusion 125

III Conclusion

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES 127
6.1 Conclusion 127
6.2 Perspectives 130
6.2.1 Perspectives à court terme 130
6.2.2 Perspectives à long terme 131

Annexes 139

A Recommandation de concepts 140

B Échantillonnage probabiliste 143

C Tests statistiques 145

D Traces d'interactions et de recommandations 147
D.1 Exemple d'une trace d'interaction 147
D.2 Exemple d'une trace de recommandation 148

E Publications 150

Liste des tableaux

2.1 Tableau de synthèse des approches de recommandation 36
2.2 Tableau de synthèse des approches adaptatives 49

3.1 Exemple de données patrimoniales 63

5.1 Questionnaire pour valider les hypothèses liées à Exp_A 98
5.2 Extrait de commentaires pour l'expérimentation Exp_A 102
5.3 Mesures pour valider les hypothèses de l'expérimentation Exp_B 106
5.4 Tableau de contingence entre les évaluations du système et celles des utilisateurs . 110
5.5 Extrait de commentaires pour l'expérimentation *Exp1 [B]* 115
5.6 Extrait de commentaires pour l'expérimentation *Exp2 [B]* 119

Table des figures

1.1 Main dessinant main de M.C. Escher (Maturana, Varela et Jullien 1994) . . . 5
1.2 Proposition d'une approche co-évolutive humain-système pour l'exploration de bases de données . . . 6

2.1 SemaTime (Stab, Nazemi et Fellner 2010) . . . 10
2.2 TimeSpan (Loorak et al. 2016) . . . 11
2.3 VAMPS (Huse et al. 2014) . . . 12
2.4 PerspectiveWall (Mazza 2009) . . . 12
2.5 ThemeRiver (Havre, Hetzler et Nowell 2000) . . . 13
2.6 Cube spatio-temporel (Gatalsky, N. Andrienko et G. Andrienko 2004) . . . 14
2.7 Visualisation des activités des individus dans l'espace et le temps (J. Chen et al. 2011) 15
2.8 VAiRoma (Cho et al. 2016) . . . 15
2.9 DOITree (Heer et Card 2004) . . . 16
2.10 InterRing (J. Yang, Ward et Rundensteiner 2002) . . . 17
2.11 MoireGraphs (Jankun-Kelly et K.-L. Ma 2003) . . . 18
2.12 Web Forager (Card, Robertson et York 1996) . . . 18
2.13 Vizster (Heer et Boyd 2005) . . . 20
2.14 Métaphore d'une ville, visualisation des pages web (Bonnel et al. 2006) . . . 21
2.15 Recommandation d'objets d'apprentissage (Y. J. Yang et C. Wu 2009) . . . 28
2.16 Exposition virtuelle adaptative . . . 32
2.17 Intent Radar (Ruotsalo et al. 2013) . . . 33
2.18 adapTIVE (Santos et Osorio 2004) . . . 45

3.1 Positionnement de l'approche proposée par rapport à l'État de l'art . . . 53
3.2 Principe détaillé de l'approche co-évolutive pour l'exploration d'une base de données 58
3.3 Un extrait d'exemple de structure sémantique appliquée au patrimoine . . . 61
3.4 Système de renforcement des arcs . . . 67
3.5 Exemple de renforcement des arcs entre deux concepts . . . 68
3.6 Processus d'évolution de l'environnement 3D . . . 75

4.1 Exemple de relation sémantique entre deux concepts . . . 82
4.2 Représentation graphique des objets patrimoniaux via des œuvres . . . 83
4.3 Représentation graphique des emplacements d'objets via des salles . . . 84
4.4 Outils de navigation . . . 85
4.5 Présentation des informations sur un objet . . . 87
4.6 Musée basé sur les modèles sémantiques de données . . . 88
4.7 Architecture client-serveur du « musée virtuel vivant » . . . 88

4.8 Un exemple de parcours avec création dynamique de salles. 90
4.9 Version 2D du « musée virtuel vivant » 91
4.10 Objets patrimoniaux dans la version immersive 91
4.11 Sélection d'un objet patrimonial dans la version immersive 91
4.12 Consultation des informations sur un objet dans la version immersive 91
4.13 Pointage et ouverture d'une porte dans la version immersive 92
4.14 Outil Carte dans la version immersive 92
4.15 Outil Frise chronologique dans la version immersive 92
4.16 Nouvelle salle à explorer dans la version immersive 93
4.17 Extrait d'ontologies sur les livres publiés par ACM 94
4.18 « Musée virtuel vivant » sur les publications scientifiques : données de ACM 94

5.1 Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h1.1 [A] 100
5.2 Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h1.2 [A] 101
5.3 Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h2.1 [A] 101
5.4 Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h2.2 [A] 101
5.5 Répartition des données par thématique 104
5.6 Outils implémentés dans la version évaluée lors de l'Exp_A 105
5.7 Distribution des participants en *Exp1 [B]* selon leur âge 108
5.8 Distribution des participants en *Exp2 [B]* selon leur âge 108
5.9 Photos de la salle d'expérimentation et de quelques participants 108
5.10 Réponses à la question **q2** 110
5.11 Réponses à la question **q3** 110
5.12 Réponses à la question **q4** 111
5.13 Traces d'interaction d'un explorateur curieux 112
5.14 Trace d'interaction d'un explorateur calme 113
5.15 Trace d'interaction d'un explorateur en profondeur 114
5.16 Trace d'interaction des explorateurs guide 114
5.17 Trace d'interaction d'un explorateur de type « suiveur » 115
5.18 Boxplot sur le nombre d'objets consultés en 2D et en 3D 116
5.19 Boxplot sur le nombre de salles visitées en 2D et en 3D 117
5.20 Réponses à la question **q5** 117
5.21 Réponses à la question **q6** 118
5.22 Réponses à la question **q7** 119
5.23 Réponses à la question **q9** 120
5.24 Fréquences d'utilisation des outils pendant l'exploration en 3D 121

A.1 Processus de recommandation de concepts 141

Introduction et État de l'art

1 INTRODUCTION GENERALE 2

1.1 Contexte

1.2 Positionnement

1.3 Organisation du mémoire

2 ETAT DE L'ART 8

2.1 Visualisation de données

2.2 Recommandation de données

2.3 Adaptabilité du système à l'utilisateur

2.4 Conclusion

1 INTRODUCTION GENERALE

1.1 Contexte

Les évolutions technologiques de ces dernières décennies génèrent une croissance importante des données. Elles sont souvent hétérogènes et présentent des liens complexes, liens qui cachent des informations implicites pouvant être importantes pour comprendre une situation. Leur exploitation devient une grande préoccupation pour les entreprises, les laboratoires de recherche et certaines entités étatiques. La croissance considérable de ce volume de données incite ces acteurs à chercher des solutions efficaces pour faciliter leur compréhension. La problématique de cette thèse concerne l'étude d'outils informatiques capables d'apporter un certain nombre de solutions axées sur la découverte d'information en s'inspirant du paradigme de l'énaction.

La découverte d'information se différencie de la recherche d'information par le fait que l'individu ne sait pas exactement ce qu'il cherche. Son questionnement sur le domaine, s'il en a un, est flou et imprécis. Selon Fayyad, la découverte d'information à partir d'une base de données consiste à développer des méthodes et des techniques pour donner un sens aux données (Fayyad, Piatetsky-Shapiro et Smyth 1996). Plus les données sont en grande quantité et présentent de nombreuses relations entre elles, plus leur exploration est complexe et demande du temps. Il est alors nécessaire d'avoir des outils dédiés. Plusieurs applications sur la découverte d'information ont été développées et ont été utilisées dans différents domaines. Des exemples de telles applications comme celle proposée par Chen et al. pour étudier les activités quotidiennes des individus dans un quartier (J. Chen et al. 2011) et celle proposée par Stab et al. qui permet de découvrir les événements qui se sont produits pendant une période de temps donnée (Stab, Nazemi et Fellner 2010).

Nous considérons que les approches de découverte d'information peuvent être classées en deux catégories. La première consiste à faire des approximations de la réalité pour faire des prédictions, pour étudier des corrélations entre les variables, ou pour voir la tendance générale des données en utilisant des modèles mathématiques, statistiques

ou des modèles de classifications des données. Parmi elles, nous pouvons prendre par exemple :

— des systèmes de dépannage, utilisés dans le domaine de fabrication des avions pour diagnostiquer et prédire des pannes (Fayyad, Piatetsky-Shapiro et Smyth 1996), (Lukacova, Babic et Paralic 2014) , (Matthews et al. 2013).
— des systèmes utilisés dans le domaine de l'astronomie pour analyser et classifier des images : *SKICAT* (Fayyad, Piatetsky-Shapiro et Smyth 1996), *PhotoRApToR* (Cavuoti, Brescia et Longo 2014).
— des systèmes utilisés dans le domaine du marketing pour analyser et identifier des groupes de clients, leurs comportements et les liens entre eux : *Busness Week* (Fayyad, Piatetsky-Shapiro et Smyth 1996), (Ngai, Xiu et Chau 2009).

La seconde catégorie est représentée par des approches exploratoires. Ces approches consistent à donner la possibilité d'accéder et d'interagir avec les données afin de déterminer les caractéristiques particulières de chacune d'elles mais également de pouvoir identifier des relations entre elles selon différents points de vues. Parmi ces approches, on peut citer par exemple :

— un système appliqué dans le domaine du marketing pour découvrir des informations sur les ventes (Piateski et Frawley 1991).
— un système d'exploration de données sur les traitements des patients (Loorak et al. 2016).
— un système d'exploration de données historiques pour découvrir l'histoire d'une ville ou d'un pays (Cho et al. 2016).

1.2 Positionnement

Dans notre travail de recherche, nous nous intéressons aux approches exploratoires permettant de découvrir des informations et d'avoir une vision synthétique sur les relations entre les données. Pour la plupart des approches existantes, le parcours d'exploration est plus ou moins prédéfini. C'est le cas par exemple lors de la lecture des documents, la consultation de données via des sites web ou des environnements 3D (Gatalsky, N. Andrienko et G. Andrienko 2004), (Bonnel et al. 2006), (Bonis et al. 2013) et même lors de la visualisation d'informations à l'aide des graphes (Heer et Card 2004) (Jankun-Kelly et K.-L. Ma 2003). Cependant, les parcours prédéfinis risquent de perdre l'utilisateur dans une masse d'informations qui ne l'intéressent pas. Pour pallier ce problème, de nouveaux systèmes d'exploration de données sont proposés. Leur principal objectif est de personnaliser le parcours. Quelques exemples de ces systèmes sont présentés dans la section 2.2. Ils estiment les besoins de l'utilisateur selon l'historique de son parcours, son profil, voire même les avis ou les parcours des autres utilisateurs ayant le même profil que lui. Ils ne récupèrent que les informations considérées pertinentes pour l'utilisateur. Le choix

des données récupérées et leur présentation dépendent alors du comportement de l'utilisateur. La problématique commune de ces nouveaux systèmes se trouve au niveau de l'estimation des besoins de l'utilisateur, ainsi qu'au niveau de la présentation des données pour que l'utilisateur ait une vision synthétique des liens entre les données.

Dans le cadre de cette thèse, notre travail se focalise sur l'utilisation du paradigme de l'énaction en tant que guide de construction de connaissances. Nous parlons de guide car il s'agit pour nous d'un point de vue original qui amène à penser d'une manière particulière une proposition d'interaction. La vision de la cognition selon le paradigme de l'énaction a été proposée par Varela, Thompson, Rosch et Maturana (Rosch, Thompson et Varela 1991). Même si elle voit ses origines en biologie, elle s'est élargie aux sciences cognitives et l'idée directrice est de considérer la co-évolution entre un agent et son environnement comme étant la base de la construction de ses représentations de cet environnement. L'agent n'est pas un récepteur passif de l'apport de cet environnement, mais est un acteur sur son environnement (Stewart et al. 2010). Son expérience dépend de sa façon d'agir. Il est en interaction avec des projections de lui même et il les modifie selon son expérience. Ces relations entre l'action et l'expérience sont façonnées par la dotation biologique de l'agent.

Ainsi, lorsqu'on parle des systèmes énactifs, quelques éléments clés sont à considérer parmi lesquels il y a l'autonomie et l'incarnation (Vernon 2010).

— L'autonomie est la capacité d'un système à se gouverner lui-même et à s'auto-organiser, selon ses propres règles. Cela signifie qu'il est capable d'opérer indépendamment de l'environnement et sans être contrôlé de l'extérieur. Pour cela, l'environnement n'est pas une entrée à traiter mais une perturbation que le système va compenser.

— L'idée de l'incarnation est que le système doit exister dans le monde en tant qu'entité physique et pouvant interagir avec son environnement. Autrement dit, le système peut agir sur les éléments de l'environnement, qui peuvent, à leur tour, agir sur lui.

La métaphore de *la marche pour chemin* permet d'illustrer le concept de l'énaction. Elle indique que c'est en marchant que nous créons notre propre chemin. Par exemple, un groupe de musique de jazz réagit en fonction des propositions d'un musicien. Cette réaction du groupe crée de nouvelles perceptions pour ce musicien, qui vont influencer ses prochaines interactions. Ce musicien ajuste sa façon de jouer (ses notes) en fonction des réactions des autres musiciens et de ce qu'il entend de sa musique. Nous pouvons dire alors que le groupe et le musicien co-évoluent. C'est grâce à l'expérience que les propositions de l'artiste évoluent. La « trace » laissée par cette expérience peut également influencer les prochaines créations de ses propres morceaux et devenir de nouvelles musiques. Une autre illustration du concept de l'énaction est présentée sur la figure 1.1.

C'est un dessin de l'artiste M.C. Escher qui illustre des mains qui se dessinent mutuellement. A partir de ce dessin, il est difficile d'identifier la « vraie » main. Maturana et Varela ont essayé de montrer à partir de cette figure qu'il y a une circularité entre nos actions et nos expériences. On utilise des instruments d'analyse pour analyser notre instrument d'analyse. Autrement dit, les processus impliqués dans nos actions et dans nos activités forment notre connaissance et cette connaissance influence nos actions. *Toute action est connaissance et toute connaissance est action* (Maturana, Varela et Jullien 1994).

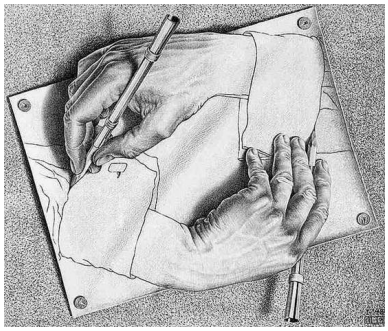


Figure 1.1 – Main dessinant main de M.C. Escher (Maturana, Varela et Jullien 1994)

Nous nous inspirons de la métaphore de *la marche pour chemin* pour concevoir notre approche d'exploration de données. Pour cela, nous pouvons considérer que le musicien représente un utilisateur, le public et les autres musiciens représentent les données, l'air représente l'interface entre l'utilisateur et les données parce qu'il permet d'envoyer et de percevoir des informations sonores. La particularité de notre approche par rapport aux autres approches de découverte de données est que pour nous, l'environnement d'exploration devient la projection des comportements de l'utilisateur grâce à une certaine autonomie dont nous allons le doter. Cette autonomie va favoriser une co-évolution rapide et complexe, qui, nous l'espérons, va favoriser la construction d'un sens, propre à chaque utilisateur.

La figure 1.2 illustre les grands principes de notre approche co-évolutive pour l'exploration d'une base de données : l'utilisateur interagit avec les données, ces interactions peuvent changer la visualisation des données, ce qui lui donne une nouvelle perception et influence ces prochaines interactions. Pour réaliser cette approche, trois questions de recherche ont été soulevées :

— Quelle méthode mettre en œuvre pour la visualisation de données afin que l'utilisateur ait une vision synthétique des liens complexes entre elles ?

— Quels algorithmes adopter pour évaluer, en temps réel, les intentions de l'utilisateur en tenant compte d'une part (i) de son profil et d'autre part (ii) des connaissances a priori, afin de générer des informations pertinentes ?

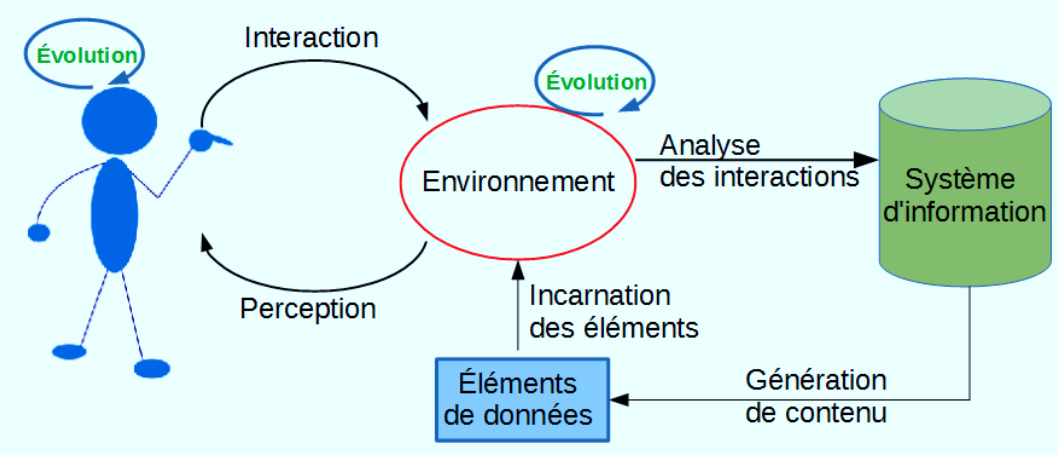


Figure 1.2 – Proposition d'une approche co-évolutive humain-système pour l'exploration de bases de données

— Comment adapter dynamiquement l'interface en fonction des comportements de l'utilisateur et de son évolution afin de l'aider à comprendre et à avoir des repères pendant son exploration ?

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet nommé ANTIMOINE (ANthropologie des TerrItoires - lecture du patriMOINE), financé par l'ANR (Agence National de Recherche). Son principal objectif est de proposer une approche permettant de faire « une lecture anthropologique adaptative » en utilisant une base de données dédiée au patrimoine ainsi que des techniques de la réalité virtuelle. C'est donc un projet qui est pluridisciplinaire par essence. L'hypothèse qui est faite est que cette lecture peut être réalisée, en partie, par le parcours d'une base de données répertoriant des informations sur les objets patrimoniaux et les liens complexes existants entre eux. Faire une lecture anthropologique c'est se focaliser sur les liens qui peuvent exister entre les objets du patrimoine afin de se construire une représentation des sociétés humaines qui les ont produites et qui sera propre à chaque lecteur. Pour établir les liens entre les données, le projet ANTIMOINE adopte une approche basée d'une part sur l'étude d'une sémantique des données afin d'en proposer une ontologie et d'autre part sur l'étude de leur description textuelle. Cette proposition permet au système d'interpréter le parcours de l'utilisateur afin de s'adapter à ses centres d'intérêt estimés et à l'aider à se construire un sens par le biais de son parcours. Cette adaptabilité constitue l'originalité du projet relativement à la lecture anthropologique à partir du terrain, de livres, de sites web, d'applications mobiles. Mon travail de thèse est une contribution aux aspects adaptation et interaction en utilisant la réalité virtuelle. Dans le cadre de ce projet, notre approche qui est **l'approche co-évolutive humain-système pour l'exploration d'une base de données**, considère le patrimoine comme un domaine illustratif mais elle se veut générique.

Mon travail consiste à mettre en place un système d'exploration de données qui nécessite d'une part l'incarnation en 3D des objets afin que la structure de l'espace 3D reflète la structure sémantique, spatiale, et temporelles des données et d'autre part l'auto-organisation des informations de façon à ce qu'elles puissent guider l'utilisateur et rendre les informations compréhensibles. L'utilisateur est considéré comme acteur de l'exploration car ses interactions peuvent changer l'environnement. Le système doit alors évoluer en fonction des comportements de l'utilisateur lors de son parcours qui lui devient propre. Tout en évaluant les comportements de l'utilisateur, le système doit être capable de lui suggérer, en temps réel, des informations estimées pertinentes par rapport aux centres d'intérêt de l'utilisateur, mais aussi de lui laisser découvrir des informations éloignées de ses centres d'intérêt mais considérées pertinentes par le système, en particulier grâce à l'ontologie.

La réalisation de ce travail de thèse nous amène à étudier les différentes approches existantes en rapport avec nos questions de recherche, à formaliser notre approche, à l'implémenter et à évaluer certaines hypothèses sous-jacentes qu'elle implique.

1.3 Organisation du mémoire

Ce mémoire se structure selon 6 chapitres.

Le chapitre 2 est un état de l'art sur la visualisation de données, sur la recommandation, ainsi que sur l'adaptation de ce type de système à un utilisateur.

Le chapitre 3 est notre proposition en tant que telle. Elle s'appuie sur des principes d'incarnation de données en 3D associés à l'auto-organisation de leur présentation en fonction du comportement de l'utilisateur. Le chapitre propose une formalisation de ces principes dans un cadre générique.

Le chapitre 4 présente les différentes implémentations de notre proposition qui ont été réalisées dans le but de montrer sa généricité et de mettre en place l'évaluation de certains aspects de son fonctionnement.

Le chapitre 5 présente ces évaluations. Il est à noter que deux séquences d'évaluation ont été réalisées. La première en milieu de thèse, a permis d'affirmer la proposition présentée au chapitre 3. La deuxième peut être considérée comme l'évaluation finale de notre proposition.

Enfin, le chapitre 6 dresse une conclusion générale sur le travail et propose différentes perspectives.

2

ETAT DE L'ART

Mettre en place un système d'exploration d'une base de données nécessite d'aborder plusieurs thématiques scientifiques : la visualisation et les interactions avec les données, la sélection des données à présenter, ainsi que l'adaptabilité du système aux utilisateurs.

La visualisation joue un rôle important parce qu'elle intervient principalement sur la qualité de la perception des informations qu'elle représente. Le choix d'une visualisation peut diminuer ou augmenter la charge cognitive de l'utilisateur et influence la qualité de son interprétation et de sa compréhension. Plus l'organisation des données a un sens et est facile à comprendre, plus l'utilisateur peut avoir une vision synthétique des liens entre ces données, ce qui favorise son interprétation. Par ailleurs, les interactions ne peuvent pas être séparées de la visualisation parce que pour avoir une meilleure perception des données, il faut interagir avec leurs représentations. Les interactions aident l'utilisateur à réaliser son exploration et à aller vers les informations qui l'intéressent le plus. Elles doivent alors être définies de façon à ce qu'elles soient intuitives pour l'utilisateur.

Même si la visualisation de données et les interactions permettent d'aider l'utilisateur à avoir une vision synthétique sur un ensemble de données et à maîtriser son exploration, cela ne résout pas totalement le problème de compréhension d'informations et d'acquisition des connaissances lorsque nous avons une base de données complexe. Cela sous-entend que les données sont en grande quantité et elles présentent de nombreuses relations de différentes natures entre elles. Plus nous avons une quantité importante de données à visualiser simultanément, plus il est difficile d'en extraire des informations. Il est alors nécessaire de faire une sélection ou une recommandation de données « pertinentes».

Cette sélection se base généralement sur la force des liens sémantiques entre les éléments de la base de données et les informations consultées par l'utilisateur, mais peut aussi prendre en compte son profil et son comportement afin de récupérer les données correspondant à ses besoins.

Le profil et les comportements de l'utilisateur peuvent être définis dès le début de son exploration mais ils peuvent aussi évoluer pendant celle-ci. Cette évolution peut résulter de ce qu'il a perçu, ainsi que de sa personnalité. Par conséquent, pour assurer la continuité de l'exploration de l'utilisateur et pour mieux le guider dans son exploration, il est important que le système soit capable de s'adapter à ses changements de comportements. Cette adaptabilité du système permet à l'utilisateur de construire progressivement « son » parcours et de lui donner du sens.

Notre état de l'art est structuré selon ces trois domaines : la visualisation de données, la recommandation de données et l'adaptabilité du système à l'utilisateur.

Sommaire

2.1	**Visualisation de données**	**9**
2.1.1	Visualisation de données de structures ordonnées	10
2.1.2	Visualisation de données spatio-temporelles	13
2.1.3	Visualisation de données hiérarchiques	16
2.1.4	Visualisation de données multi-dimensionnelles	19
2.1.5	Synthèse sur les approches de visualisation	21
2.2	**Recommandation de données**	**23**
2.2.1	Approches basées sur un modèle de données	25
2.2.2	Approches basées sur un modèle utilisateur	26
2.2.3	Approches hybrides	30
2.2.4	Synthèse sur les approches de recommandation	38
2.3	**Adaptabilité du système à l'utilisateur**	**39**
2.4	**Conclusion**	**50**

2.1 Visualisation de données

Dans le cadre de cette thèse, l'objet de la visualisation de données est d'avoir :
— une représentation compréhensible de chacune d'elles,
— une représentation des liens existants entre elles,
— une possibilité d'interagir avec elles.

Cela permet à l'utilisateur d'identifier des informations pertinentes ou de découvrir des informations inattendues. De plus, nous nous intéressons aux outils de visualisation dédiés à l'exploration de données. Ceci écarte alors les modèles mathématiques, statistiques ou les systèmes de classification car ils ont tendance à faire disparaître les données en les remplaçant par d'autres grandeurs, ce qui ne favorise pas une exploration

même si cela facilite l'analyse. Il existe plusieurs façons de classer les approches de visualisation comme par exemple suivant les types de données, les types d'interactions, le nombre de dimensions décrivant les données, ou l'objet de la visualisation. Dans notre cas, nous avons catégorisé ces approches selon les natures des relations existant entre les données.

2.1.1 Visualisation de données de structures ordonnées

Le fait qu'il existe des relations d'ordre entre les données (par exemple : ordre chronologique, ordre séquentiel) mène à des types de visualisation spécifiques.

Stab et al. ont proposé une approche nommée *SemaTime* (Stab, Nazemi et Fellner 2010) qui permet de visualiser la structure hiérarchique des données dans l'espace temporel et de montrer les dépendances sémantiques qui existent entre elles. Sur la figure 2.1, le panneau de gauche montre les différentes périodes de l'histoire, ordonnées verticalement dans le temps, le panneau central montre les différents événements correspondants à la période sélectionnée qui sont ordonnés chronologiquement dans le sens horizontal et le panneau de droite montre les descriptions des événements sélectionnés. L'utilisateur peut avoir une vue d'ensemble ou de détail sur les données en étendant ou en regroupant les niveaux de hiérarchies différents. Il peut naviguer en déplaçant le plan d'interaction horizontal. L'avantage de cette approche est qu'elle permet d'identifier les événements qui se sont passés pendant une période déterminée ou à une date spécifique donnée. Malgré l'apport important en terme d'interaction, cette approche présente des limites en termes d'exploration et de visualisation parce que pour voir les événements pendant une période, il faut d'abord savoir où se trouve cette période dans la hiérarchie. De plus, dès qu'il y a un nombre élevé d'événements dans une même période, la qualité de lisibilité des données diminue. Enfin, il est difficile de comparer des événements qui se sont produits pendant deux périodes éloignées.

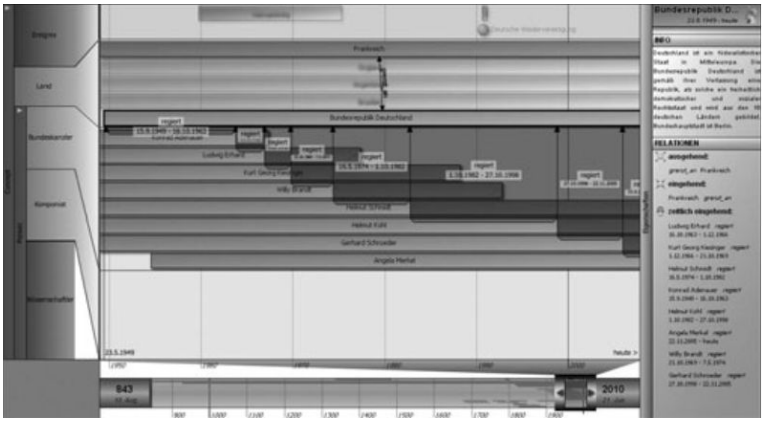


Figure 2.1 – SemaTime (Stab, Nazemi et Fellner 2010)

Une autre approche nommée *TimeSpan* a été proposée dans le domaine médical

pour suivre des processus de traitements des patients, plus précisément des personnes victimes d'un AVC (Loorak et al. 2016). L'idée est de développer un outil permettant aux experts d'explorer les données relatives aux patients afin d'aider ces experts à analyser l'impact des procédures de traitement sur leur activité et de reconnaître des événements et des comportements spécifiques de patients.

L'outil *TimeSpan* permet également aux experts d'avoir une vision synthétique ou une

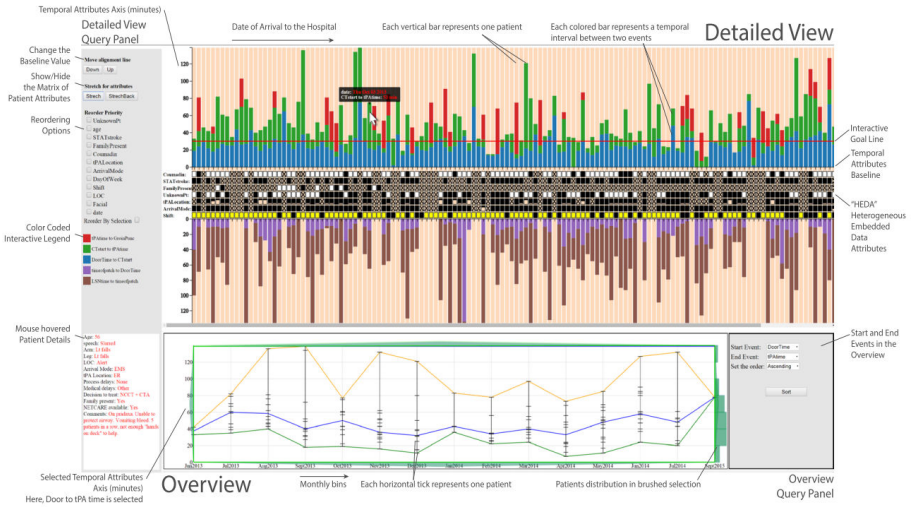


Figure 2.2 – TimeSpan (Loorak et al. 2016)

vision détaillée des données dans le temps selon l'ordre qu'ils choisissent. Il permet de voir les données d'un ensemble de patients traités pendant une période donnée et de les comparer, ce qui permet de découvrir de nouvelles informations et d'en extraire de la connaissance. Ils peuvent aussi voir des informations détaillées concernant un seul patient. L'interface donne à l'utilisateur la possibilité de définir les périodes de temps qu'il veut consulter. Sur la figure 2.2, chaque barre représente un patient et chaque couleur représente un intervalle de temps entre deux événements. Avec cette approche, il est difficile d'interpréter et de visualiser les différentes couleurs quand il y a plusieurs événements. Enfin, elle ne permet pas de comparer les données des patients ou des groupes de patients traités pendant deux périodes de temps éloignées.

VAMPS est une approche de visualisation de données appliquée au domaine du biomédical (Huse et al. 2014). Elle permet aux experts du domaine de visualiser les données relatives aux séquences de gènes, d'analyser la diversité des communautés microbiennes et les relations entre ces communautés et ainsi d'explorer leurs analyses et leurs interprétations sur des quantités massives de données. La figure 2.3 montre les données sur les taxons [1] des échantillons d'eau prélevés dans une caserne de pompiers à Falmouth, Royaume-Uni, en utilisant *VAMPS*. L'outil permet de voir l'insuffisance ou l'abondance de certains taxons pour un mois donné. Il permet également de détecter des

1. un taxon est une entité conceptuelle regroupant les organismes qui ont en commun certains caractères

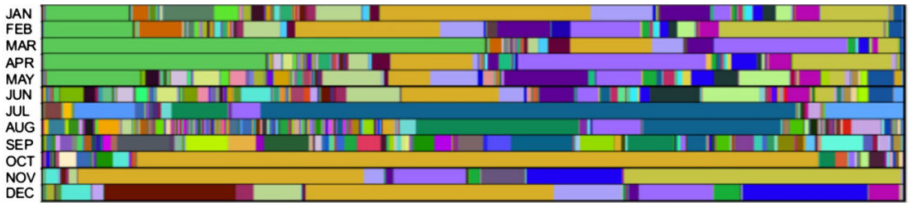


Figure 2.3 – VAMPS (Huse et al. 2014)

anomalies et de comparer les données des différentes périodes. Le principal avantage de cette approche tient au fait qu'elle permet aux experts de combiner plusieurs niveaux de taxonomies et d'analyser les communautés microbiennes à ces niveaux, ainsi que de sélectionner un ou plusieurs taxons à analyser. Cette approche utilise d'autres méthodes de visualisation comme les diagrammes et les tableaux pour donner plus d'informations sur les taxons sélectionnés. L'un des inconvénients de cette approche est la difficulté de la perception des couleurs lorsqu'il y a un nombre important de taxons de différents types. De plus, l'intervalle de temps est limité sur une année.

D'autres approches utilisent des métaphores de visualisation comme celles proposées par Mackinlay : *TimeWall* et *PerspectiveWall* (Mackinlay, Robertson et Card 1991). Ces approches utilisent une technique de visualisation « focus+contexte » qui permet à l'utilisateur de consulter des informations particulières en détail tout en bénéficiant d'une vue d'ensemble de toutes les informations du contexte. Les données sont projetées sur trois panneaux. Le panneau central sert à présenter les détails des informations pendant une période donnée et les deux autres permettent de donner un effet de perspective correspondant aux données affichées sur le panneau central. Les données sont ordonnées horizontalement par ordre chronologique et verticalement par catégorie de contextes. La figure 2.4 présente une version améliorée du *PerspectiveWall* (Mazza 2009). L'outil est facile à manipuler. Il aide également l'utilisateur à comprendre les liens entre les données. La limite de l'approche est que les panneaux de présentation des données peuvent être surchargés s'il existe un grand nombre d'événements identifiés pendant une période donnée.

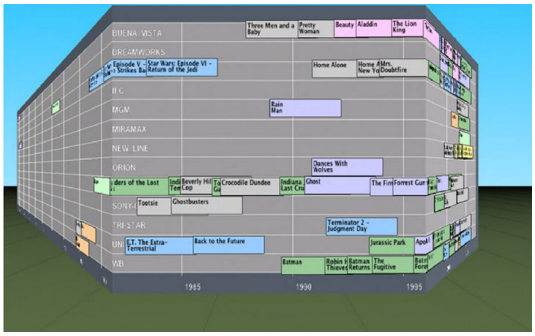


Figure 2.4 – PerspectiveWall (Mazza 2009)

Havre Hetzier et Nowell ont proposé un autre outil de visualisation de données chronologiques, nommé *ThemeRiver*, utilisant la métaphore d'une rivière (Havre, Hetzler et Nowell 2000).

Sur la figure 2.5, nous pouvons identifier les changements thématiques des documents

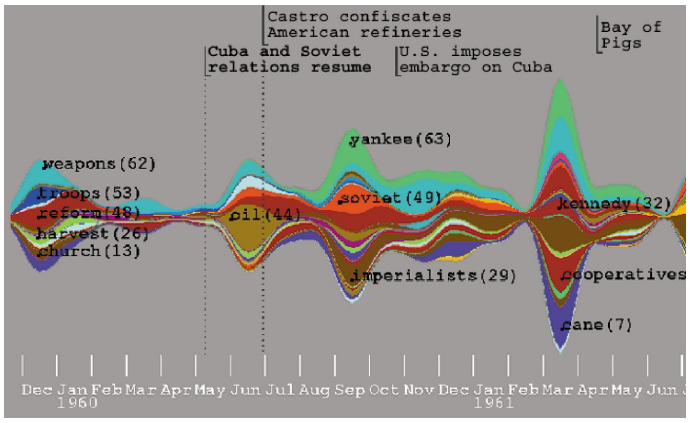


Figure 2.5 – ThemeRiver (Havre, Hetzler et Nowell 2000)

publiés dans le temps. Plus on avance vers la droite, plus on découvre les thématiques des documents récemment publiés. De la même façon que la largeur d'une rivière change d'un endroit à un autre, l'épaisseur des différentes couches de couleur évolue ici dans le temps. Chaque couche de couleur indique une thématique et son épaisseur dépend de la quantité de documents qui sont liés à elle. Cette approche met en évidence la notion de proportionnalité et présente l'avantage de permettre de comparer les thématiques de deux périodes différentes, même éloignées. Mais elle présente aussi des limites en termes de visualisation : la qualité de lisibilité diminue lorsqu'il y a une quantité importante de thèmes à visualiser et les thèmes qui ne sont liés qu'à quelques documents seulement risquent de ne pas être visualisés sur l'interface.

2.1.2 Visualisation de données spatio-temporelles

La visualisation de données spatio-temporelles permet d'identifier les événements qui se sont passés dans un endroit donné à une période de temps donnée. Ce type de visualisation est utilisé dans plusieurs domaines comme par exemple dans l'histoire, le transport, ou la médecine.

Une méthode qui permet d'avoir une vision synthétique de données spatio-temporelles est de les présenter dans un cube (environnement 3D) comme celui proposé par Gatalsky et al. dans (Gatalsky, N. Andrienko et G. Andrienko 2004). Les événements sont représentés par des points, leur taille et leur couleur permettent d'identifier la catégorie thématique à laquelle ils appartiennent. Leurs positions par rapport à la carte et à l'axe vertical permettent respectivement d'identifier les lieux et les périodes sur lesquels ou pendant lesquelles ils ont été réalisés. Cette approche est appliquée aux données de tremble-

ments de terre en Turquie, entre 1976 et 1999, qui contiennent 10550 événements.
Le principal avantage de cette approche est que l'utilisateur peut détecter facilement des

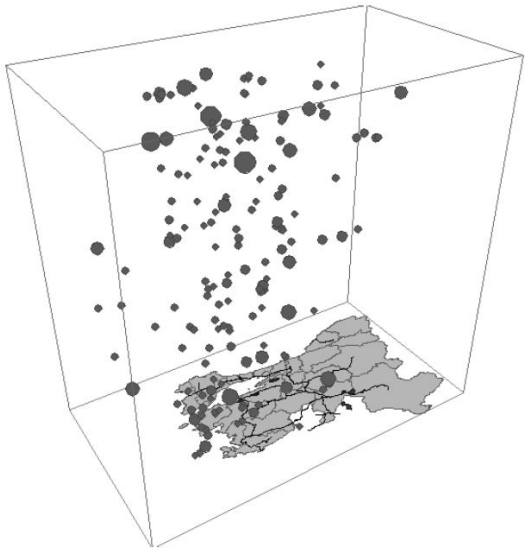


Figure 2.6 – Cube spatio-temporel (Gatalsky, N. Andrienko et G. Andrienko 2004)

groupements de données et peut interagir avec la visualisation en choisissant l'intervalle de temps qu'il veut consulter. Dans le cadre d'application de cette approche, les données sur les tremblements de terre peuvent être groupées selon la profondeur de leur épicentre, leur magnitude, leur intensité, ou leur caractéristique sismique. Cette approche présente d'inévitables inconvénients liés à la visualisation d'une quantité importante de données et à la comparaison des données dans des périodes ou territoires éloignés. Ainsi, la projection des points sur la carte est difficile à identifier.

Jie Chen et al. ont proposé une approche permettant d'étudier les déplacements des individus dans un quartier ou dans une ville lors d'une propagation d'épidémies (J. Chen et al. 2011). Cette approche est appliquée au domaine du transports et son principal objectif est de faciliter l'analyse exploratoire des activités des individus.
Sur la figure 2.7, les points bleus sur la carte représentent des patients, les lignes représentent les traces de leurs activités journalières dans le temps et dans l'espace. Si la ligne est une droite, cela veut dire que les individus exercent leurs activités journalières sur place. Si la ligne est coudée, cela signifie que les individus voyagent et travaillent à l'extérieur de leur quartier. Les couleurs des lignes représentent les différents types d'activités, tandis que leur longueur représente la durée des activités. L'avantage de cette approche est qu'elle permet aux experts d'avoir une vision synthétique sur un individu ou sur un ensemble d'individus. Elle permet aussi de comparer les données des individus en sélectionnant les territoires ou les périodes à étudier. Pourtant avec cette approche, la qualité de perception se dégrade lorsque les individus ont plusieurs activités dans une journée, ou lorsqu'on veut voir ces activités pendant une durée plus longue (en semaines, en mois, ou en années).

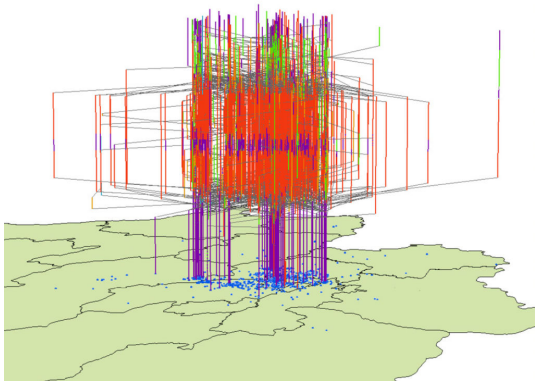


Figure 2.7 – Visualisation des activités des individus dans l'espace et le temps (J. Chen et al. 2011)

VAiRoma est une approche proposée par Cho et al. (Cho et al. 2016). Son principal objectif est de pouvoir extraire et découvrir des connaissances sur l'histoire de Rome : à partir des événements qui se sont produits pendant une période donnée ou sur un territoire donné et à partir des relations entre ces événements.

Nous pouvons voir sur la figure 2.8 l'interface principale de l'outil *VAiRoma*. Cette inter-

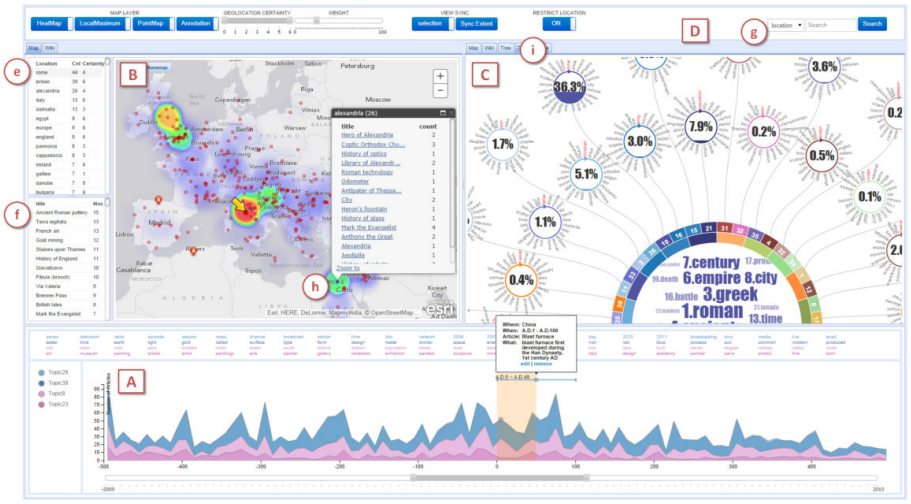


Figure 2.8 – VAiRoma (Cho et al. 2016)

face est divisée en plusieurs parties dont les principales sont les parties (A), (B) et (C). La zone (A) présente des données par ordre chronologique. Chaque couleur aux niveaux des courbes correspond à un thème. La zone (B) montre la carte de l'Europe et elle permet de positionner géographiquement des événements à l'aide des points. La zone (C) montre les différentes thématiques des données, leur structure hiérarchique, ainsi que les pourcentages de données correspondants à chaque concept des thématiques. Cette approche utilise une technique de visualisation « multi-vues » et présente plusieurs avantages : elle permet à l'utilisateur de sélectionner une ou plusieurs période(s), lieu(x), ou thématique(s) qui l'intéressent. De plus, les données affichées sur l'interface changent en

fonction de cette sélection. Ainsi, l'aspect « multi-vues » donne la possibilité à l'utilisateur de voir une même information sous différentes perspectives (espace temporel, spatial et thématique). Il aide l'utilisateur à accéder facilement et rapidement aux données et à comprendre les liens. L'utilisation de la carte favorise la navigation dans l'espace, la frise chronologique permet d'identifier les périodes remarquables, l'espace thématique permet de découvrir les différents thèmes apparus dans les données. De plus, cette approche permet à la fois d'avoir une vision synthétique et détaillée des données sous différentes perspectives mais aussi de comparer des données de différentes périodes ou de différents lieux. Une des limites se situe au niveau des superpositions des points sur la carte si plusieurs événements sont à positionner.

2.1.3 Visualisation de données hiérarchiques

Il existe plusieurs méthodes permettant de visualiser des structures hiérarchiques. Cette hiérarchie peut être présentée sous forme d'arbre, de disques, de graphes, ou également sous d'autres types de visualisation en utilisant des métaphores.

Un exemple de visualisation sous forme d'arbre est présenté dans (Heer et Card 2004). Il permet à l'utilisateur de naviguer et de choisir le nœud qu'il veut consulter. L'orientation de l'arbre n'est pas fixe, l'utilisateur peut choisir le sens de son exploration : de haut en bas, de bas en haut, de gauche à droite ou de droite à gauche. Les nœuds visités sont mis en évidence pour aider l'utilisateur à se repérer et à explorer de nouveaux nœuds.
L'approche utilise la même technique de visualisation que celle proposée par Robert-

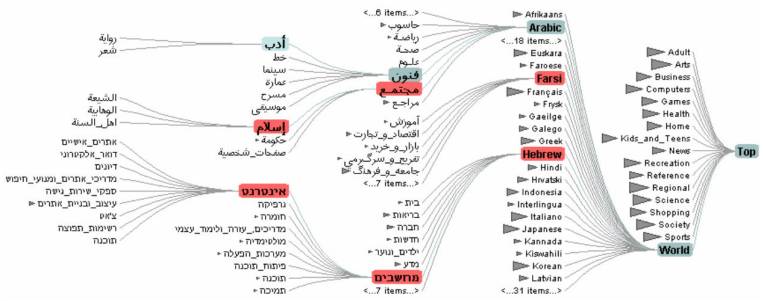


Figure 2.9 – DOITree (Heer et Card 2004)

son et al. (Robertson, Mackinlay et Card 1991) qui est le « Cone Tree ». Ce type de visualisation de données nécessite beaucoup d'espaces lorsqu'il y a plusieurs niveaux de hiérarchies ou une quantité importante d'informations dans un nœud. Des solutions sont mises en œuvre telles que : l'agrégation des nœuds non pertinents par rapport à l'exploration de l'utilisateur ; la mise en place de barres de défilement ; la possibilité d'avoir plusieurs nœuds explorés afin de comparer les données associées à ces nœuds. Mais cela n'aide pas toujours l'utilisateur à avoir une vision synthétique sur les données. Les données se trouvant aux niveaux les plus bas de l'arbre risquent de ne pas être visitées si cet arbre présente une hiérarchie profonde.

Certaines approches présentent une structuration hiérarchique des données sous forme radiale comme celle proposée par Yang et al. (J. Yang, Ward et Rundensteiner 2002).

Les sections, identifiées par leurs catégories de couleurs, représentent des catégories

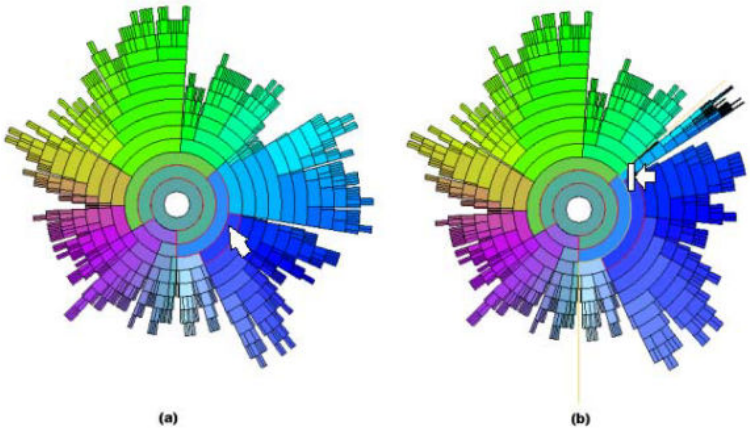


Figure 2.10 – InterRing (J. Yang, Ward et Rundensteiner 2002)

de concepts. Dans chaque section, les différentes couches de couleurs représentent des sous catégories de concepts. Plus la couche est proche du centre du disque, plus le concept qu'il représente est abstrait et sa couleur est obtenue à partir de la moyenne des couleurs de ses couches supérieures. L'utilisateur peut interagir avec l'outil en sélectionnant une ou plusieurs sections du disque (voir Figure 2.10 a). Les sections sélectionnées seront mises en évidence (voir Figure 2.10 b) : elles s'élargissent et les autres se rétrécissent. Cet outil permet de faire de la sélection dynamique pour explorer. Son principal défaut est que le nombre de catégories de données est limité en fonction du rayon du disque. Ainsi, les couleurs des sections ne sont pas faciles à percevoir lorsqu'il y a plusieurs catégories de concepts.

Les graphes sont aussi un moyen permettant de présenter la structure hiérarchique des données. *MoireGraphs* est une illustration de ce type de visualisation (Jankun-Kelly et K.-L. Ma 2003) qui utilise la technique de visualisation « focus + contexte ».

L'utilisateur peut interagir avec l'outil *MoireGraphs* en sélectionnant un élément du graphe qui l'intéresse. Cet élément sera déplacé au centre du disque via une animation. Il est considéré comme élément focal (« focus »). Cet élément attire ses descendants via une force et repousse les autres. Tous les éléments du disque sont alors mis à jour en fonction de cet élément focal. L'utilisateur peut sélectionner une couche pour mettre en évidence tous les éléments situés d'un même niveau comme le montre la Figure 2.11 : le niveau 1 (Figure 2.11 (b)) et le niveau 2 (Figure 2.11 (c)) sont mis en évidence. La structure des données sous forme de graphe et les animations aident l'utilisateur à comprendre les liens entre les données. Une autre illustration de visualisation sous forme de graphe est

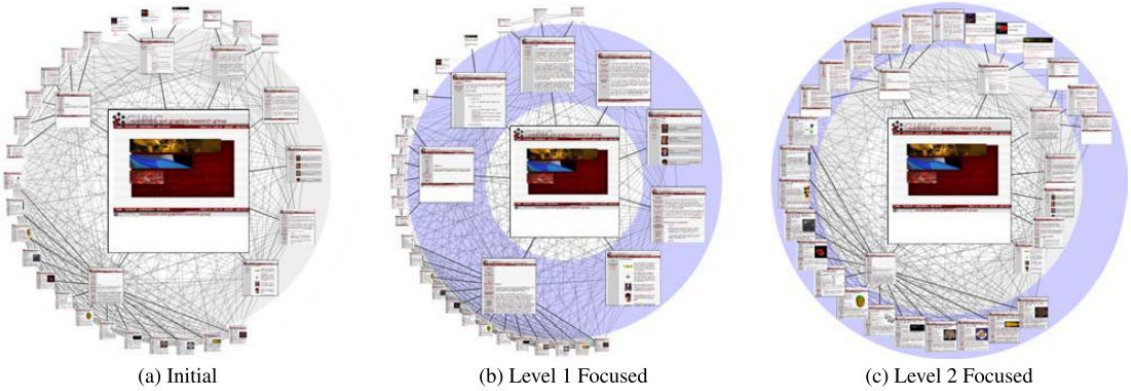


Figure 2.11 – MoireGraphs (Jankun-Kelly et K.-L. Ma 2003)

présentée dans (Holten 2006). Ses particularités se trouvent au niveau de la délimitation de surface, par des bords, pour chaque niveau du graphe, afin d'avoir une meilleure visualisation et ainsi également au niveau des formes des courbes qui relient les nœuds. La visualisation sous forme de graphes souffre également d'un problème d'espace lorsque les données à visualiser sont en grande quantité.

Certaines approches utilisent des métaphores de visualisation afin de présenter les données à l'utilisateur dans un environnement qui lui est familier. Cela permet de l'aider à identifier facilement la structure hiérarchique entre les données. Card et al. ont proposé une approche de visualisation de données, nommé *Web Forager*, qui se base sur la métaphore d'une bibliothèque (Card, Robertson et York 1996).

Figure 2.12 – Web Forager (Card, Robertson et York 1996)

WebForager est appliquée à une base de données de sites web. Pour cela, les pages web sont présentées dans des pages de livres. Un livre représente une catégorie de concepts ou une thématique. Les livres ayant le même niveau hiérarchique sont présentés sur une même étagère. Les rayons sont formés par plusieurs étagères qui peuvent avoir des libellés correspondant aux livres qu'elles supportent. Le livre consulté par l'utili-

sateur se trouve au milieu de l'interface de visualisation (voir Figure 2.12) et est considéré comme le « focus » d'exploration de l'utilisateur. Les livres liés à ce dernier sont affichés en arrière plan. Les livres lus sont placés sur la table afin d'avoir une trace de parcours d'exploration de l'utilisateur et d'accéder rapidement aux informations déjà consultées en cas de besoin.

2.1.4 Visualisation de données multi-dimensionnelles

Les données multi-dimensionnelles sont caractérisées par plusieurs paramètres et peuvent être représentées par des vecteurs caractéristiques. Elles présentent alors de nombreux liens entre elles (un ordre ou un lien sémantique). Ce type de données peut être présenté selon différentes perspectives. Leur visualisation associée à des outils interactifs permet à l'utilisateur de changer de perspective lors de son exploration.

Ainsi, *WebBook*, proposé par Card et al. (Card, Robertson et York 1996) est un exemple d'approche de ce type de visualisation. Cette approche utilise la même métaphore de bibliothèque que *Web Forager*. Les pages web qui sont représentées par des pages de livres sont liées entre elles par des liens. Dans chaque page, il existe alors des liens permettant d'accéder directement à d'autres pages. Ces pages peuvent être à l'intérieur du livre consulté ou dans d'autres livres. Les pages peuvent être liées par leurs thématiques, leurs auteurs, ou leurs dates d'éditions. Ce type d'interface met en évidence la possibilité de faire une exploration par dimension. Il permet à l'utilisateur d'accéder rapidement aux informations qui l'intéressent et de découvrir de nouvelles informations. L'inconvénient de cette approche est que l'utilisateur n'a pas l'historique des pages qu'il a consulté. Il ne peut pas comparer les contenus de deux ou plusieurs pages différentes.

Une autre illustration de visualisation de données multi-dimensionnelles, nommée *Vizster*, a été proposée par Heer et Boyd (Heer et Boyd 2005). Cette approche est appliquée à des données concernant les membres de réseaux sociaux. Elle permet de découvrir les relations entre les membres. Cette approche implémente un système de « masse-ressort » pour montrer les données correspondant à la donnée consultée par l'utilisateur. Pour cela, les nœuds ayant une faible connectivité ont une valeur de tension élevée. La valeur de tension attribuée à chaque nœud est inversement proportionnelle au logarithme du degré du nœud connecté ayant le nombre minimum d'arêtes. Un nœud est au degré 1 par rapport à un autre nœud s'ils sont connectés directement entre eux.
Sur la figure 2.13, les nœuds représentent les membres et les arêtes représentent les relations sociales entre ces membres. Cette approche de visualisation permet d'identifier la structure globale des données, mais aussi de connaître les informations en détail des membres et de leurs relations. L'utilisateur peut interagir avec le système en cliquant sur un nœud pour afficher les informations sur un membre ou en double cliquant sur un nœud pour afficher sa connexion. Le système masse-ressort permet à l'utilisateur de connaître

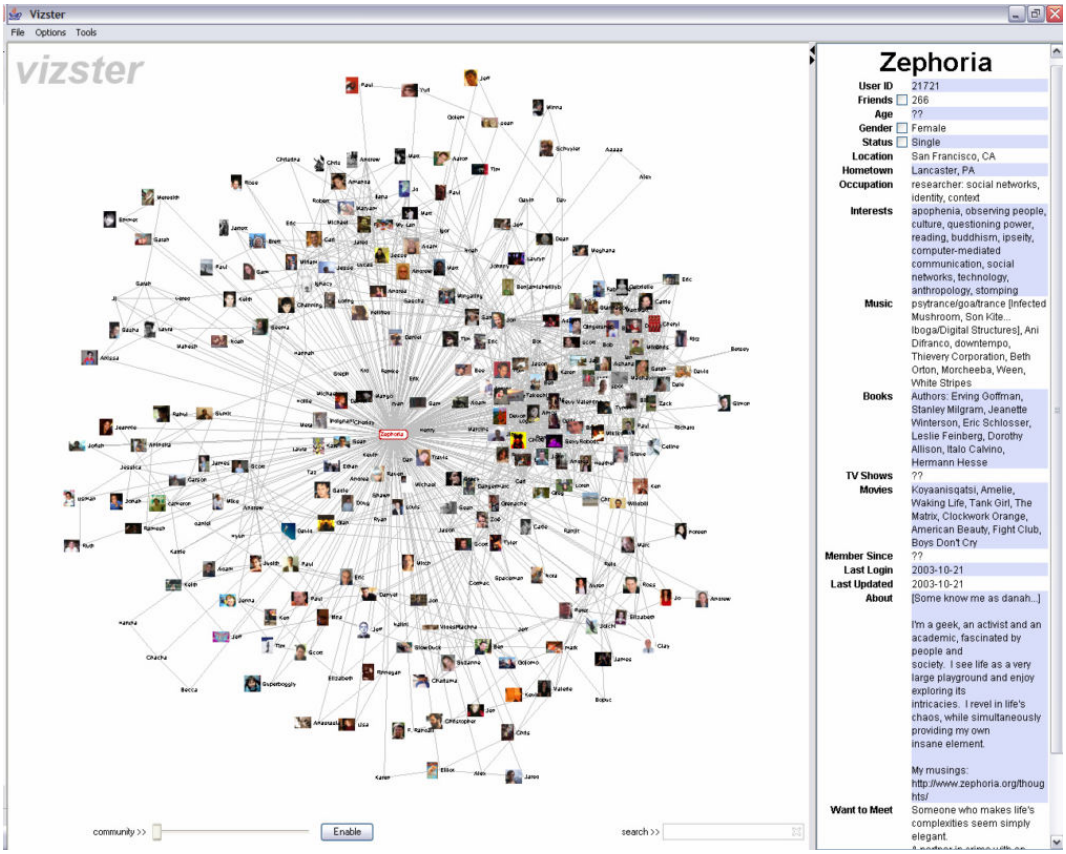


Figure 2.13 – Vizster (Heer et Boyd 2005)

les données liées à ce qu'il consulte et de les consulter rapidement. Lorsqu'il y a plusieurs données liées à plusieurs relations, la visualisation et la navigation deviennent complexes.

La métaphore d'une ville permet également de présenter les relations complexes d'un ensemble de données. Plusieurs travaux ont été publiés dans ce domaine, nous pouvons citer l'approche proposée par Bonnel et al. (Bonnel et al. 2006) et celle proposée par Dieberger et Frank (Dieberger et Frank 1998). La structure d'une ville présente plusieurs relations de similarités, un système de regroupement, ainsi que des liens entre les groupes. L'idée commune des approches basées sur la métaphore d'une ville est d'adapter les structures et infrastructures d'une ville aux relations entre les données. Bonnel et al. ont appliqué leur approche à une base de données contenant des informations sur des pages web. Chaque bâtiment représente une page web : les pièces et les étages permettent de montrer la similarité existante entre différentes pages web. Les façades permettent de montrer les contenus des pages. Les quartiers représentent le groupement de pages web ayant la même thématique ou présentant des caractéristiques communes. Les liens entre les données et les groupes de données peuvent être représentés par des chemins, ou des routes. L'utilisateur peut avoir une vision synthétique des relations entre les données à partir de la structure de la ville : groupement des bâtiments, leur hauteur et les chemins. Cette métaphore permet aussi de détecter l'importance ou non de certaines informations

dans certains groupes de données. Ce type de visualisation souffre également d'un problème de taille de l'espace. Enfin, les interactions pour les changements d'échelles ne sont pas faciles à définir (interaction permettant de partir d'un groupe pour arriver à un autre).

Figure 2.14 – Métaphore d'une ville, visualisation des pages web (Bonnel et al. 2006)

2.1.5 Synthèse sur les approches de visualisation

Nous avons présenté dans la section 2.1 différentes approches de visualisation de données qui peuvent être classées en quatre catégories selon la nature des relations entre les données : des relations d'ordres, des relations spatio-temporelles, des relations hiérarchiques et des relations multiples.

— La visualisation des données ayant une structure ordonnée consiste à mettre en évidence les relations d'ordre des données : ordre chronologique ou ordre séquentiel. Les données sont souvent ordonnées horizontalement. Certains outils de visualisation permettent d'avoir une vision globale ou de détail sur les données (zoomer ou explorer). La majorité des outils présentés ne permettent pas à l'utilisateur de comparer des données de différentes périodes éloignées. L'utilisateur peut interagir avec les outils en sélectionnant une(des) information(s) ou en explorant les informations dans un certain ordre. Le problème commun des approches pour ce type de données se trouve au niveau de la dégradation de la qualité de perception lorsqu'il y a une quantité importante de données dans une même période de temps.

— La visualisation de données spatio-temporelles a pour objectif d'identifier les différents événements dans un endroit pour une période donnée. La majorité des approches de ce type utilisent des cartes pour faciliter l'exploration et la perception de données spatiales. L'utilisateur peut interagir avec le système en sélectionnant une(des) information(s) ou en explorant les informations dans l'espace et dans le temps. Ce type de visualisation aide l'utilisateur à voir les données sous différentes perspectives (technique de visualisation « multi-vues ») et aussi d'avoir une vision

globale ou de détails. La problématique commune de ce type de visualisation est la superposition de plusieurs points sur la carte dès que la quantité de données à visualiser est importante.

— Les données hiérarchiques peuvent être présentées sous forme d'arbre, sous forme de disque, sous forme de graphe, ou sous d'autres formes en utilisant des métaphores. Des couleurs, des animations sont utilisées pour mettre en évidence les données consultées par l'utilisateur et pour montrer les liens de ces données avec d'autres (réorganisation automatique des données). La majorité des approches de visualisation utilisant des données de structures hiérarchiques implémente une technique de visualisation « focus+contexte ». Certaines approches utilisent des métaphores pour présenter les données dans un environnement auquel l'utilisateur est familier pour faciliter la compréhension des liens. Les approches de ce type de visualisation souffrent généralement d'un problème de place et de qualité de perception.

— Les données multi-dimensionnelles sont liées entre elles par plusieurs types de relations qui peuvent être hiérarchiques ou non comme par exemple des relations spatiales, sociales, ou thématiques. La visualisation de ce type de données consiste à mettre en évidence les relations entre les données et permet à l'utilisateur d'explorer rapidement des données similaires. L'inconvénient majeur de ce type de visualisation est la complexité de la perception en cas d'abondance des données et des liens entre elles.

L'étude de ces différentes approches a permis d'identifier leurs avantages dans le but de les intégrer dans notre approche, ainsi que leurs limites afin de proposer des solutions pour les améliorer. Nous pouvons citer ci-après quelques moyens permettant d'aider l'utilisateur lors de son exploration : la possibilité de zoomer ou d'explorer des données, la notion de proportionnalité de répartition des données qui peut être visualisée au niveau de l'interface, l'utilisation des outils de navigation (par exemple, carte, ou frise chronologique), l'implémentation d'un système masse-ressort, la présentation des données en 3D, la possibilité de voir les données selon différentes perspectives, la réorganisation automatique des données, l'utilisation de métaphores et la possibilité d'explorer selon les différentes dimensions.

Après l'analyse des différentes approches que nous avons présentées, nous avons constaté que la plupart des outils de visualisation ne permettent pas à l'utilisateur de voir sa trace d'exploration ou l'historique de ce qu'il a consulté. Or, pour nous, la trace d'exploration est un élément non négligeable parce qu'elle permet à l'utilisateur d'avoir des repères et de guider son exploration. La possibilité de comparer des informations est aussi importante pour l'utilisateur parce que cela lui permet de comprendre les liens entre les données et d'en avoir une vision synthétique. Nous avons constaté également que

la problématique commune des approches de visualisation se situe au niveau de la perception d'une base de données complexe : grande quantité de données et nombreuses relations entre elles. Plus la base de données est complexe, plus il est difficile de saisir des informations à partir de sa visualisation. D'où l'intérêt de la sélection des données à présenter à l'utilisateur.

Pour ne pas présenter d'un coup toutes les informations, nous adoptons une approche qui permet de visualiser de façon incrémentale les données. L'évolution de cette visualisation incrémentale dépend des comportements de l'utilisateur pendant son exploration. Cela permet à l'utilisateur de comparer des données et de comprendre des relations entre elles. Il a la trace de son parcours à partir de cette visualisation, ce qui lui permet d'avoir une vision synthétique sur un ensemble ou un sous-ensemble de données, ainsi que d'avoir des repères dans son exploration.

Synthèse

Les approches de visualisation de données peuvent être classées selon la nature des relations qui existent entre les données. Les qualités de visualisation diffèrent d'un point de vue à un autre. L'évaluation peut s'appuyer sur la facilité et/ou la diversité des interactions, la possibilité d'avoir une vue globale et de détail des données, la facilité de compréhension des liens entre les données, la rapidité d'accès aux informations, la qualité de la perception, la lisibilité des données, ou la possibilité de consulter en même temps un ensemble de données et de pouvoir les comparer.

2.2 Recommandation de données

L'idée commune des systèmes de recommandation est de pouvoir proposer quelques données, parmi un grand nombre possible, correspondant au mieux aux besoins des utilisateurs. Ce système est indispensable tant au niveau de la recherche d'information qu'au niveau de l'exploration de données lorsque nous avons une base de données complexe. Les données peuvent être organisées ou ordonnées selon différents critères, ce qui permet à l'utilisateur d'avoir des repères lors de sa recherche ou de son exploration et de comprendre l'origine de certaines recommandations.

Lorsque l'on parle du système de recommandation, trois éléments clés sont à consi-

dérer :

— **le modèle de données**
Un modèle de données consiste à décrire les caractéristiques des données. Il repose sur l'étiquetage de ces dernières ou sur la définition des valeurs de ses paramètres caractéristiques. L'étiquetage peut être réalisé par une étude syntaxique en extrayant des mots clés à partir des textes descriptifs, par une étude sémantique en utilisant des connaissances a priori des experts sur un domaine (décrites par des ontologies), ou par un système d'indexation de données. Les paramètres caractéristiques des données sont définis selon différents points de vues. Ces valeurs peuvent être définies a priori ou évoluées dans le temps. C'est le cas par exemple des paramètres correspondant à la réputation, au nombre de vues, ou au nombre de partages.

— **le modèle utilisateur**
L'objectif d'un modèle utilisateur est de pouvoir définir les centres d'intérêt (ou de désintérêt) des utilisateurs par rapport aux données selon leurs comportements, donc de définir leur profil. Les profils utilisateurs peuvent être définis soit à partir des informations implicites soit à partir des informations explicites, par exemple, à partir :
  — d'informations basiques qu'on demande aux utilisateurs (âge, sexe, profession, ou niveau d'expertise par rapport aux données).
  — de l'historique de leur recherche ou de leur exploration (données consultées, lues, ou partagées).
  — des informations extraites de leurs interactions avec des système tiers (réseaux sociaux, mails, ou sites visités).
  — de leurs satisfactions qui sont définies via des notes d'évaluation ou des historiques d'interactions.

  Il existe des approches qui utilisent, en plus de ces données, des algorithmes d'apprentissage automatique pour déterminer les profils d'utilisateurs. Nous pouvons citer ci-après quelques exemples tels que : les systèmes multi-agents, les algorithmes de fourmis, la logique floue, les réseaux de neurones ou les approches Bayésiennes.

— **Le moteur de recommandation**
Un moteur de recommandation vise à déterminer les informations à suggérer aux utilisateurs selon leur profil (exploration), ou leurs requêtes (recherche). Dans le cadre de cette thèse, nous classifions les approches de recommandation en trois catégories : (i) les approches qui se basent sur le modèle de données , (ii) les approches qui se basent sur le modèle utilisateur et (iii)les approches hybrides mixant les deux modèles. Les approches se différencient à ce niveau sur la méthode de détermination des données à recommander. Différentes méthodes peuvent être uti-

lisées telles que : la mesure de similarité entre les données et les requêtes ou entre les données et les profils d'utilisateurs, les systèmes à base de règles, l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage automatique, les systèmes d'activation et de propagation, ainsi que l'introduction d'une part d'aléatoire pour favoriser la sérendipité.

Il existe actuellement une grande quantité d'approches de recommandations de données. A travers certaines d'entre elles, nous allons en extraire les principes. La plupart des approches actuelles sont des approches hybrides dont le but est de combiner les avantages des approches basées sur des modèles de données et celles basées sur des modèles utilisateurs.

2.2.1 Approches basées sur un modèle de données

Puisque les approches basées sur un modèle de données ne prennent pas en compte les profils utilisateurs, la plupart d'entre elles sont appliquées pour la recherche à partir des critères explicites. Ces approches prennent en entrée par exemple des mots clés saisis par l'utilisateur ou encore des données sélectionnées.

Yang et al. ont proposé une approche de recommandation de vidéos basée sur un modèle syntaxique de données (B. Yang et al. 2007). L'approche prend en entrée la vidéo sélectionnée par l'utilisateur et les informations qui la concernent (titre, texte fourni par son producteur) et donne en sortie une liste de vidéos correspondant à ce que l'utilisateur est en train de regarder ou aux préférences de l'utilisateur. La particularité de cette approche est qu'elle essaie de combiner des données multi-modales pour faire une recommandation et qu'elle ne se base seulement sur l'étude de similarité des vidéos au niveau textuel, mais aussi au niveau visuel et au niveau sonore. Au niveau textuel, l'approche caractérise les données à partir de vecteurs des mots clés en utilisant le *TF-IDF*[2] (Term Frequency-Inverse Document Frequency) et des *SVM*[3] (Support Vector Machine). La caractéristique visuelle est mesurée par l'histogramme des couleurs normalisées, l'intensité du mouvement et la fréquence de prise de vues (le nombre moyen d'images par seconde). Au niveau sonore, l'approche utilise la moyenne et l'écart-type des tempos pour caractériser les vidéos. Le tempo moyen représente la vitesse de la musique ou de l'audio, tandis que l'écart type indique la fréquence de changement du style musical. Lors d'une recommandation, chaque vidéo présente des valeurs de pertinences (système de pondération) par rapport à la vidéo regardée par l'utilisateur selon ces trois paramètres (textuel, visuel et sonore). Pour combiner les pertinences multimodales pour chaque vidéo, l'approche utilise une fonction nommé *AFF* (Attention Fusion Function), qui a eu un

2. approche de détermination de pertinence des mots qui se base sur leur co-occurrence dans un document (https ://fr.wikipedia.org/wiki/TF-IDF)
3. technique de classification supervisé

certain succès dans la récupération d'informations multimédia en exploitant la variance de la pertinence multimodale. L'approche proposée met en avant les différentes mesures de similarités des vidéos à partir de leur contenu. Son avantage est qu'elle permet de faire une recommandation sans prendre en compte les profils explicites d'utilisateurs. Pourtant, l'inconvénient est qu'elle se base seulement sur la vidéo que l'utilisateur est en train de regarder, ce qui ne permet pas de personnaliser les résultats de recommandation en fonction des vidéos qu'il a déjà consultées auparavant. L'un des objectifs des systèmes de recommandation est de guider l'utilisateur dans sa recherche ou dans son exploration, mais la non prise en compte des informations consultées ne permet pas à cette approche de réaliser ce système de guidage.

Une autre approche nommée *VSQ* (Visual Query Suggestion), a été proposée par Zha et al. (Zha et al. 2009). Cette approche est appliquée au domaine de la recherche d'images et s'est basée sur un modèle syntaxique. Chaque image a sa description textuelle et est codée par des vecteurs de mots clés. L'objectif principal de l'approche est d'aider, de façon plus précise et plus rapide, les utilisateurs à spécifier leur intention de recherche. Supposons que l'utilisateur cherche des images correspondant au mot clé « *apple* ». Ce mot présente une ambiguïté parce qu'il peut correspondre à un fruit, à un ordinateur ou à un smartphone. Pour cela, le système retourne une liste d'images pertinentes avec les mots qui les décrivent. La mesure de pertinence se base sur la co-occurrence des mots clés dans la description des images. Si l'utilisateur sélectionne une image, les mots clés correspondant à cette image seront ajoutés à la requête initiale de l'utilisateur pour raffiner sa recherche et la liste des images recommandées sera également mise à jour. Les résultats retournés sont ordonnés selon leur pertinence par rapport à la recherche. L'approche proposée améliore de façon incrémentale ses résultats de recommandation en fonction des images sélectionnées par l'utilisateur pour satisfaire ses besoins. Elle permet de guider l'utilisateur dans sa recherche en fonction des informations qu'il a consultées auparavant. L'inconvénient de cette approche est que l'utilisateur risque de se perdre dans sa recherche parce qu'il n'a pas de repères sur les données qu'il a déjà consultées. Ainsi, il n'a pas la possibilité d'indiquer au système ses centres de désintérêt pour éliminer les informations qui ne lui conviennent pas.

2.2.2 Approches basées sur un modèle utilisateur

Les approches basées sur un modèle utilisateur utilisent des informations fournies plus ou moins directement par l'utilisateur pour pouvoir lui suggérer des informations correspondant à ses centres d'intérêt. Ces approches sont souvent appliquées à des données qui n'ont pas beaucoup de descriptions (des vidéos et des fichiers audio) ou à des recommandations nécessitant l'avis des utilisateurs.

Une approche de ce type a été proposée par Davidson et al. pour recommander des

vidéos personnalisées en fonction des activités des utilisateurs sur un site (Davidson et al. 2010). Différents types d'informations concernant l'utilisateur ont été prises en compte : des informations explicites (vidéos consultées, favoris, souscription à un site de téléchargement de vidéos) et des informations implicites (style de navigation, préférences). La recommandation se faisait en deux étapes :

— Tout d'abord, le système récupère les vidéos similaires candidates à ce que l'utilisateur est en train de regarder. La notion de similarité se base sur le principe de voisinage dans un graphe de relations entre des vidéos. La construction de ce graphe est réalisée à partir des historiques de consultations des utilisateurs. Deux vidéos sont considérées proches si elles sont regardées ensemble dans une courte période de temps.

— La seconde étape est de sélectionner, parmi les vidéos candidates, les vidéos les plus pertinentes par rapport aux préférences de l'utilisateur et par rapport à son style de navigation (consultation des vidéos spécifiques ou des vidéos diverses).

L'inconvénient de cette approche est qu'elle ne peut pas suggérer des informations pertinentes tant que l'utilisateur n'a pas d'historique d'exploration. Comme les approches de recommandations dédiées à la recherche d'information, l'approche proposée ne peut pas non plus faire des recommandations de façon continue. Elle doit attendre une action venant de l'utilisateur. De plus, l'approche n'étudie pas les interactions qui permettent à l'utilisateur de définir ses centres de désintérêt afin de ne pas recommander des informations qui ne l'intéressent pas et afin de le guider mieux.

Certaines approches utilisent des algorithmes d'apprentissage automatique pour définir le modèle utilisateur comme celle proposée par Chen, Duh et Liu (C.-M. Chen, Duh et C.-Y. Liu 2004). Leur approche est appliquée au domaine de l'apprentissage à distance et est basée sur les systèmes multi-agents et la logique floue. L'objectif est de fournir une interface interactive aux apprenants. Ce sont les agents qui se chargent de la recommandation des cours aux apprenants en fonction des retours et du niveau de capacité des apprenants. Les apprenants doivent répondre à des questions sur le niveau de difficulté et le taux de compréhension des cours recommandés. La capacité des apprenants est estimée à partir d'une approche Bayésienne qui utilise la notion de probabilité et d'incertitude. Cette approche met en avance les retours d'utilisateurs (données fournies explicitement) afin de sélectionner les cours à recommander et de guider l'utilisateur dans son apprentissage. Ce type d'approches oblige les utilisateurs à donner des retours à chaque recommandation, ce qui n'est pas très pratique pour l'utilisateur même si cela est beaucoup plus fiable que ce que peuvent obtenir les approches qui se basent sur les données extraites de façon implicite à partir des activités des utilisateurs. Cela augmente la charge de travail des utilisateurs.

Une autre approche appliquée au domaine d'apprentissage est celle proposée par Yang et al. (Y. J. Yang et C. Wu 2009). L'objectif principal de leur approche est de trouver des objets pédagogiques (en anglais *Learning Objects : LO*) les plus convenables à chaque apprenant selon son niveau d'apprentissage, son style d'apprentissage et ses comportements pendant son apprentissage (apprendre de préférence en regardant, en écoutant, ou en touchant). Cette approche utilise des algorithmes de fourmis pour recommander, de façon dynamique, à chaque apprenant, un objet qui lui convient le mieux à un moment donné. Pour cela, l'approche utilise un graphe où les nœuds représentent les objets pédagogiques et les fourmis représentent les apprenants (voir Figure 2.15).
Les objets pédagogiques sont caractérisés par leur type (graphique, vidéo, texte, xml)

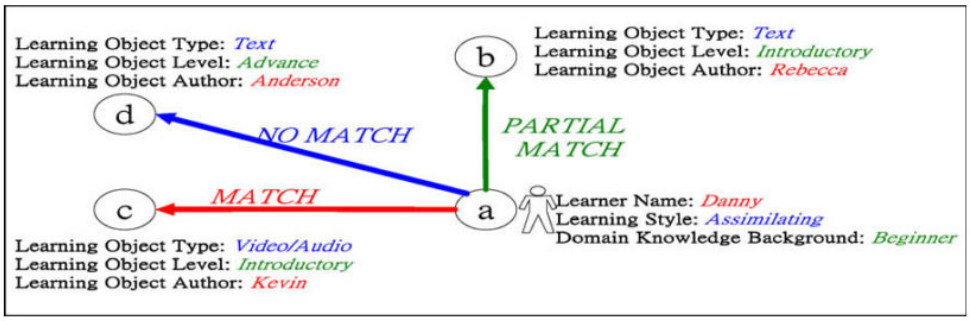


Figure 2.15 – Recommandation d'objets d'apprentissage (Y. J. Yang et C. Wu 2009)

et par leur niveau (initial, introduction, avancé, professionnel). De même, les apprenants sont caractérisés par deux attributs : le style d'apprentissage (divergeant, assimilé, convergeant, accommodé) et le niveau de connaissance (apprenti, débutant, intermédiaire, expert). L'approche implémente un système à base de règles pour définir si un apprenant correspond totalement ou partiellement à un objet pédagogique selon ses caractéristiques. Si un apprenant passe d'un objet d'apprentissage à un autre, une quantité de phéromones est déposée sur les arêtes qui relient ces deux nœuds (les objets pédagogiques) dans le graphe. Cette procédure se répète à chaque fois qu'un apprenant change d'objets pédagogiques. La quantité de phéromones déposées dépend de la correspondance entre l'apprenant et l'objet pédagogique choisi par l'apprenant. Si l'apprenant ne change pas d'objet d'apprentissage pendant un certain moment, les phéromones sur les arêtes non utilisées diminuent petit à petit. L'objet pédagogique recommandé est celui qui a la quantité de phéromone la plus élevée. L'approche prend en compte la combinaison des apprentissages à long terme et une prédiction heuristique instantanée pour recommander un objet pédagogique à un apprenant. L'avantage de l'utilisation de l'algorithme de fourmis est qu'il permet de mettre à jour les valeurs des pertinences des données non seulement en fonction des interactions des utilisateurs mais aussi en fonction de l'absence d'utilisateur. La limite de l'approche se situe au niveau de la non mise en évidence des recommandations pertinentes afin de mieux guider l'utilisateur.

Walter et al. ont proposé une autre approche basée sur le système de confiance

des réseaux sociaux pour faire des recommandations (Walter, Battiston et Schweitzer 2008). Cette approche peut être appliquée à plusieurs domaines tels que : le commerce (par exemple, le partage d'opinions sur l'évaluation des services commerciaux), ou la recherche scientifique (recommandation de journaux, de conférences ou de workshop). L'idée de base de leur approche est d'utiliser les informations sur les réseaux sociaux des utilisateurs et sur les relations de confiance entre eux pour enrichir les informations pour la recommandation et d'utiliser ces relations de confiance pour filtrer les informations pertinentes. Chaque utilisateur est représenté par un agent. Les agents sont connectés entre eux par des liens sociaux (famille ou amis). Cette connexion est représentée dans un graphe qui peut être dynamique en évoluant selon le changement de confiance entre les utilisateurs. Chaque agent a une liste de préférences sur les données et une valeur de confiance envers chacun de ses voisins du graphe (la valeur de confiance est entre 0 et 1 et cette valeur est égale à 0.5 à l'état initial). La relation de confiance existe seulement entre les agents qui sont directement connectés. Pour cela, si un agent veut acheter un produit, il demande à ses voisins des informations concernant le produit à acheter. Si ses voisins ne peuvent pas fournir d'informations sur ce produit, ils demandent à leur tour à leurs voisins et ainsi de suite. L'agent demandeur reçoit donc un ensemble d'informations. Si les préférences des agents voisins sont hétérogènes, la notion de confiance est introduite afin de récupérer les informations pertinentes. Cette approche est intéressante par le fait qu'elle prend en compte les recommandations des personnes proches des utilisateurs au niveau social. Une de ses limites est qu'elle ne prend pas en compte les préférences de l'utilisateur ou l'historique de son exploration. Elle se base seulement sur les recommandations des autres.

Hung et Lun-ping ont proposé une autre approche appliquée au domaine du commerce en ligne (Hung 2005). Dans cette approche, les utilisateurs sont classés selon leurs fréquences d'achats et leurs préférences de marques. Les produits sont classés selon leur fournisseur et leur marque. L'objet de cette approche est de fournir une liste de produits aux clients correspondant à leurs préférences. Pour cela, elle se base sur l'historique des achats des clients. Chaque client est caractérisé par ses valeurs de *RTT* (Rencetly Repurchase Tendency) pour chaque produit et chaque marque. Ces valeurs sont comprises entre 0 et 1. Si un client a une valeur de *RTT* élevée sur un produit, il est fort probable que ce client achète de nouveau ce produit. De même, lorsqu'il y a un nouveau produit de même marque que celle du produit acheté souvent par un client, il est possible que ce client achète ce nouveau produit. La recommandation se base alors sur ces valeurs de *RTT*. Cette approche présente des limites parce qu'elle ne permet pas de suggérer de nouveaux produits, de nouveaux fournisseurs ou de nouvelles marques. Elle ne prend pas non plus en compte le style d'exploration de l'utilisateur (est ce qu'il préfère des produits spécifiques ou est ce qu'il a l'habitude de faire des découvertes). Comme la durée prise en considération par le système peut être longue (vente pendant un mois, un an ou plusieurs années), il n'est pas facile pour l'utilisateur de comprendre pourquoi

telle ou telle recommandation lui est faite à un certain moment. L'approche est également limitée en terme de guidage.

Le problème majeur des approches basées sur le modèle d'utilisateurs réside dans leur initialisation (« démarrage à froid »). Ce type d'approche a des difficultés pour recommander si l'utilisateur n'a pas encore d'historique d'exploration.

2.2.3 Approches hybrides

Les approches hybrides se basent à la fois sur la caractérisation des données et également sur la caractérisation des utilisateurs afin de déterminer la correspondance entre les deux et de faire une recommandation. Ces approches peuvent être classées en deux catégories : celles qui se basent sur la comparaison entre les caractéristiques des utilisateurs et des données et celles qui utilisent des algorithmes heuristiques et/ou des systèmes à base de règles au niveau de la recommandation en plus de la comparaison entre les caractéristiques des utilisateurs et des données.

Une approche nommée *Grisham* a été proposée par Grant et al. (Grant et al. 2015). Ils ont proposé trois types d'explorations de documents : recherche à base de mots clés, recherche ou exploration à partir d'un thème. Les documents et les utilisateurs sont caractérisés par des sacs de mots clés avec un système de pondération. Les mots clés des documents sont extraits à partir de la bibliothèque *NTLK*[4] (Natural Language ToolKit). Les utilisateurs définissent, avant leur exploration, leurs degrés d'intérêt sur des mots clés ou sur des thématiques et ils peuvent les changer au cours du temps. Ces thèmes seront recherchés dans des résumés, dans des titres , ou dans des informations sur les auteurs. Cette approche utilise des taxonomies sur les documents réalisés à partir d'une étude syntaxique qui est comparée au profil utilisateur, défini à partir des valeurs de pertinence données par l'utilisateur lui même aux mots clés, afin de faire des recommandations. L'utilisateur peut interagir avec le système en saisissant des mots ou en sélectionnant une thématique ou un document spécifique.

Aciar et al. ont proposé une approche basée sur l'extraction de mots clés et sur une ontologie pour recommander des produits aux utilisateurs (Aciar et al. 2007). Les données en entrée sont des commentaires faits par des utilisateurs qui ont déjà acheté des produits. L'ontologie est prédéfinie et présente des informations sur les utilisateurs (compétence et expérience) et sur les évaluations des différentes caractéristiques des produits. Ces évaluations sont classées en trois catégories : haute, bonne, ou mauvaise qualité. Puisqu'il est difficile d'extraire automatiquement ces classes d'évaluations à partir des commentaires, l'approche utilise un système à base de règles (*RIKTEXT*[5]) pour faire correspondre certains mots clés à une classe d'évaluation (exemple de qualité d'un appareil

4. http ://www.nltk.org/
5. outil pour faire du text-mining

photo : « rapide » $\rightarrow$ bonne, « loin » $\rightarrow$ bonne). La procédure de recommandation se fait comme suit : lorsque l'utilisateur envoie une requête, le système extrait les informations demandées dans cette requête. Ensuite, il cherche dans l'ontologie les données correspondant aux informations demandées. Il récupère toutes les informations correspondant aux commentaires du produit demandé. Si l'utilisateur montre à partir de sa requête qu'il donne plus d'importance à certains paramètres qu'à d'autres (préférences), le système met en place une pondération sur les paramètres caractéristiques des produits pour faire des recommandations. Cette détection de préférence de l'utilisateur au niveau de la requête est réalisée à partir d'un système à base de règles s'appuyant sur des mots clés. L'approche essaie de personnaliser les résultats de recherche de l'utilisateur en faisant des analyses syntaxiques de sa requête. Cette personnalisation est limitée au niveau d'une requête parce que les historiques de recherche de l'utilisateur ne sont pas pris en compte. Ainsi, l'approche ne permet pas à l'utilisateur d'avoir des repères durant sa recherche.

Beldjoudi, Seridi et Faron Zucker ont proposé une approche « collaborative » de recommandation permettant de découvrir les liens entre des données sur le web (Beldjoudi, Seridi et Faron Zucker 2017). Leur objectif est de suggérer des données personnalisées en fonction du profil d'un utilisateur. Ce profil est défini par un vecteur de mots clés que l'utilisateur a défini et ce profil peut évoluer au fil du temps. Les données sont également caractérisées par des mots clés via un système d'indexation. Ce système se base sur le principe de « folksonomie » où l'indexation est faite par les utilisateurs (ou les non spécialistes) et ils peuvent le faire librement. Le profil d'un utilisateur évolue alors en fonction des indexations qu'il a faites. L'approche utilise un système à base de règles qui définit les relations entre les mots clés. La recommandation de données se base alors sur la combinaison de ce système à base de règles, du profil utilisateur, des données en prenant en compte la similarité entre les utilisateurs et entre les données. La particularité de cette approche est qu'elle met en œuvre des algorithmes permettant de réduire les ambiguités (par exemple, un mot peut désigner plusieurs choses) et de réduire le problème d'orthographe (par exemple, une chose peut être désignée par plusieurs termes). Cette approche est sujette à un biais lié à la subjectivité des indexations faites par l'utilisateur.

Bonis et al. ont proposé une approche qui est dédiée à la visite d'une exposition virtuelle (Bonis et al. 2013). Leur objectif est de faire des recommandations via une interface d'exposition d'œuvres. Cette interface repose sur une métaphore de musée. La notion de métaphore est définie dans la section 2.1. Les objets sont arrangés dans des salles en fonction de leur thématique (voir Figure 2.16). L'approche intègre des taxonomies représentant des connaissances a priori et permettant de classifier les objets selon leurs caractéristiques. Les objets à exposer sont indexés par des concepts qui sont définis dans des taxonomies. Le but de l'approche est d'adapter et de personnaliser l'environnement et son contenu en fonction de l'utilisateur. La recommandation dépend alors des

œuvres consultées pendant l'exploration. Les interactions avec les objets conduisent au changement des valeurs représentant l'intérêt des utilisateurs dans des taxonomies par une propagation de valeur dans le graphe qui va modifier les degrés d'intérêt associés à chaque objet. Les nouvelles valeurs sont utilisées pour échantillonner l'ensemble des objets et venir peupler l'espace 3D dans lequel évolue l'utilisateur. L'approche proposée utilise des stéréotypes pour initialiser le modèle utilisateur afin d'adapter dynamiquement les profils utilisateurs et de les grouper selon leur similarité. L'utilisateur peut naviguer à l'intérieur du musée virtuel, consulter des œuvres en les manipulant ou en les faisant tourner pour avoir une meilleure perspective. Il peut donner des retours via des commentaires. Les quatre paramètres pris en compte pour mettre à jour le modèle utilisateur sont le temps de consultation, la manipulation des objets, les commentaires et les évaluations des expositions.

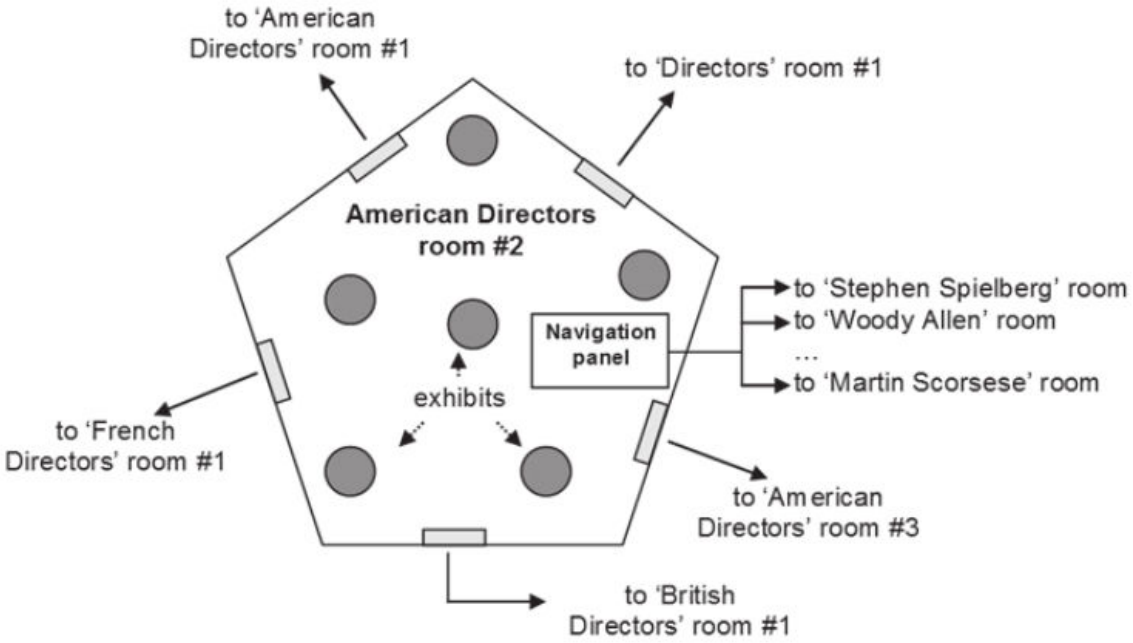


Figure 2.16 – Exposition virtuelle adaptative
(Bonis et al. 2013)

Ruotsalo et al. se sont focalisés sur la présentation et l'organisation des données dans une interface pour permettre à l'utilisateur d'interagir avec le système d'exploration, de définir ses centres d'intérêt (ou de désintérêt) et ainsi de présenter les données recommandées (Ruotsalo et al. 2013). Cette approche est appliquée au domaine de l'exploration des documents. Les documents sont caractérisés par une liste de mots clés en utilisant le *TF-IDF*. Les mots clés sont présentés sous forme radiale (voir Figure 2.17) : la zone centrale du disque (de couleur jaune) représente le « mot clé focal » ou ce que l'utilisateur est en train de consulter (ce mot clé est défini par l'utilisateur ou extrait à partir du *TF-IDF* des documents consultés), la zone C présente les mots clés pertinents ou visualisés par l'utilisateur, la zone B illustre les mots clés recommandés. La zone A présente les mots

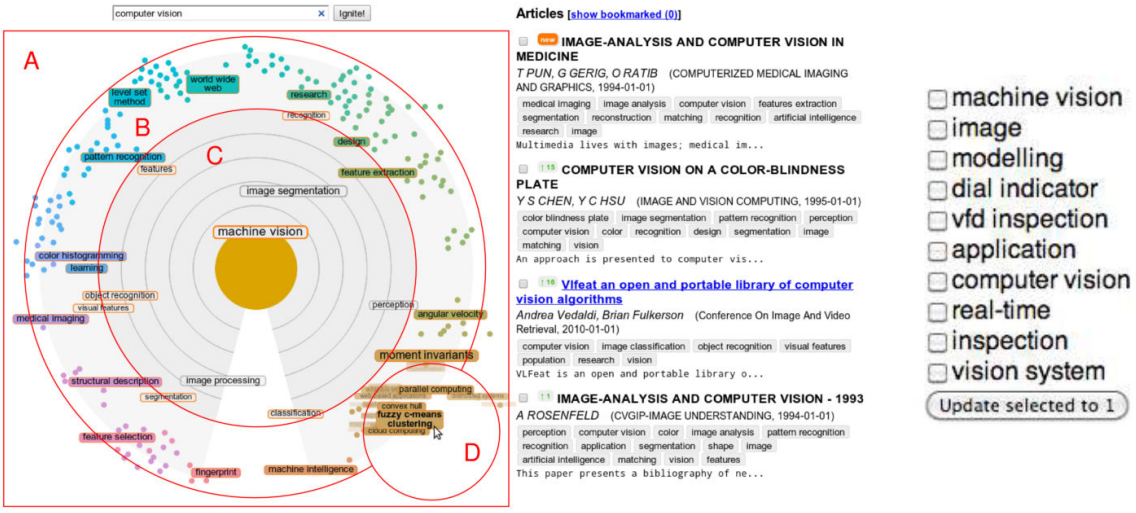


Figure 2.17 – Intent Radar (Ruotsalo et al. 2013)

clés qui ne sont ni pertinents ni recommandés. La pertinence des mots clés est représentée par leur position par rapport au centre du disque. Le cône sur le disque permet à l'utilisateur de définir plusieurs mots clés qui l'intéressent. L'utilisateur peut donner respectivement un retour positif ou négatif sur un mot clé, en le déplaçant vers le centre ou vers la zone A. À côté du disque se trouve une liste de documents (qui sont ordonnés selon leur pertinence par rapport au mot clé situé sur la zone centrale et par rapport à l'historique de l'utilisateur), ainsi qu'une liste de mots clés que l'utilisateur peut cocher. L'ordonnancement des documents, ainsi que la recommandation de mots clés utilisent un système de pondération qui se base sur les retours que fait l'utilisateur. Au début de l'exploration, puisque l'utilisateur n'a pas d'historique d'exploration, le système utilise des co-occurrences des mots clés pour ordonner les documents.

Chen et al. ont proposé une approche se basant sur un algorithme de fourmis et qui est appliquée au domaine du commerce des services via des applications mobiles (Z. Chen et al. 2010). L'approche caractérise l'utilisateur à partir de sa position, de ses activités et de son environnement. Elle caractérise également les services à partir de leur fréquence (nombre de visites des utilisateurs), de leur position géographique (distance par rapport aux autres services), de leur réputation (degré de satisfaction des utilisateurs). L'algorithme de fourmis est utilisé pour extraire les informations sur l'intensité des liens entre les services et ainsi de déterminer et d'évaluer la liste ordonnée des services à recommander à l'utilisateur. Dans son exploration, si l'utilisateur s'arrête sur un service, le système lui suggère un ensemble de services similaires à ce qu'il a déjà visité auparavant. Cette liste de services recommandés est générée par l'algorithme de fourmis en se basant sur le taux de phéromone qui évolue au cours du temps. Une fourmi représente l'utilisateur et elle dépose des phéromones pendant sa visite de services. Les phéromones s'évaporent au fil du temps.

Une autre approche nommée *CRESDUP* (Content REcommendation System based on private Dynamic User Profile) a été proposée dans (T. Chen et al. 2007). La particularité de l'approche est qu'elle utilise des informations d'utilisateurs via Internet. Cette approche utilise quatre types d'agents : un agent qui collecte les informations sur l'utilisateur, un agent qui analyse les profils d'utilisateurs (en utilisant leurs données personnelles et les retours qu'ils ont faits, les données consultées, éditées ou traitées, ses favoris), un agent qui fait des recommandations de données en fonction de leur contenu en utilisant le *TF-IDF* et un agent qui est capable de faire des recommandations à partir des données recommandées via le contenu et le profil d'utilisateur.

— Les informations concernant l'utilisateur peuvent être fournies par lui même (âge, nom, genre, localisation, profession, liste de préférences), ou peuvent être collectées via ses activités en ligne (par exemple, la liste des sites visités, la liste des sites favoris, les documents personnels, un agenda en ligne).

— Les informations collectées sont utilisées pour identifier les profils d'utilisateurs et ces profils sont dynamiques. Ils sont mis à jour en fonction des activités journalières des utilisateurs, ainsi que de leurs retours d'évaluation ou de satisfaction.

— Le système utilise une ontologie présentant des relations hiérarchiques entre des mots clés, en plus il implémente le *TF-IDF* pour évaluer la pertinence d'un ou de plusieurs mots clés par rapport aux documents (système de pondération) afin de grouper les documents. L'agent responsable de la recommandation par contenu se base sur la similarité syntaxique et sémantique des documents pour faire une recommandation.

— Un agent compare les données retournées par la recommandation par contenu aux informations sur les profils d'utilisateurs. Les relations entre ces données sont évaluées par une **fonction heuristique** et la mesure de similarité par cosinus (Huang 2008). L'agent sélectionne celles qui ont les valeurs les plus élevées.

Une approche basée sur une ontologie et sur la propagation-activation entre les concepts a été proposée par Gao et al. (Gao, Yan et M. Liu 2008). Les auteurs proposent une interface permettant aux utilisateurs d'interagir avec le système. Le système est capable de générer le profil d'un utilisateur si cela n'est pas encore défini. Pour cela, l'utilisateur doit fournir des informations sur ses centres d'intérêt par rapport aux concepts prédéfinis dans l'ontologie. A partir de cela, le système génère une ontologie propre à cet utilisateur dans lequel chaque concept est évalué en fonction des centres d'intérêt de l'utilisateur. La valeur de chaque concept est comprise entre 0 et 1. Le modèle de propagation d'activation entre les concepts permet de mettre à jour les valeurs des concepts dans l'ontologie et d'identifier ses centres d'intérêt. L'approche proposée utilise un seuil pour définir si un

concept est actif ou pas. Si un concept est actif, il propage des valeurs à ses voisins. L'idée est que l'utilisateur s'intéresse à un concept donné s'il s'intéresse aux concepts voisins de ce concept dans l'ontologie. Le système choisi les concepts ayant des valeurs élevées ou supérieures au seuil pour faire une recommandation (fonction heuristique).

Tableau 2.1 – Tableau de synthèse des approches de recommandation

Approches	**Modèle de données**	**Modèle utilisateur**	**Regroupement des profils**	**Moteur de Recommandation**
(B. Yang et al. 2007)	Modèle syntaxique (TF-IDF et SVM), informations visuelles et sonores			Similarité (AFF : Atention Fusion Function)
(Zha et al. 2009)	Modèle syntaxique (vecteur des mots clés), fréquence de sélection			Évaluation (co-occurrence)
(Davidson et al. 2010)		Préférences, partages, appréciation, style d'exploration		Proximité dans un graphe et évaluation (pondération)
(C.-M. Chen, Duh et C.-Y. Liu 2004)		Retour d'évaluation	Approche Bayésienne	Système à base d'agents et logique floue
(Y. J. Yang et C. Wu 2009)		Niveau d'apprentissage, comportements et style d'exploration	Algorithmes de fourmis	Évaluation (renforcement), système à base d'agents
(Walter, Battiston et Schweitzer 2008)		Relations sociales, retour d'évaluation		Évaluation (système de confiance)
(Hung 2005)		Historique d'achats		Évaluation (probabilité)
(Grant et al. 2015)	Modèle syntaxique (sac des mots)	Degrés d'intérêt sur des mots fournies par l'utilisateur		Évaluation (pondération) et similarité (sac des mots)

(Aciar et al. 2007)	Modèle syntaxique (text-mining), modèle sémantique (ontologie)	modèle sémantique (compétence, expérience et préférence)		Évaluation (système à base de règles et pondération)
(Beldjoudi, Seridi et Faron Zucker 2017)	Système d'indexation (folksonomie)	historique d'indexation	Similarité (vecteurs des mots clés)	Système à base de règles, similarité (vecteurs des mots clés)
(Bonis et al. 2013)	Modèle sémantique (ontologie)	Degrés d'intérêt via des interactions, propagation, commentaires	Similarité (degrés d'intérêt)	Similarité (pondération)
(Ruotsalo et al. 2013)	Modèle syntaxique (TF-IDF)	Degrés d'intérêt/désintérêt via des interactions		Évaluation (pondération et co-occurence)
(Z. Chen et al. 2010)	Modèle sémantique (ontologie), évaluation des interactions	Évaluation des interactions, évaluation de satisfaction		Évaluation (heuristique :algorithme de fourmis)
(T. Chen et al. 2007)	Modèle sémantique (ontologie) et modèle syntaxique (TF-IDF)	Données personnelles, satisfaction, degrés d'intérêt via des interactions		Similarité (entre données et profils), approche à base d'agents, évaluation (pondération)
(Gao, Yan et M. Liu 2008)	Modèle sémantique (ontologie)	Degrés d'intérêt fournis et évalués via des interactions		Système de propagation d'activation, évaluation (pondération)

2.2.4 Synthèse sur les approches de recommandation

Dans cette section 2.2, nous avons présenté différentes approches de recommandation de données. Ces approches se différencient les unes des autres selon les données et les méthodes qu'elles utilisent pour faire des recommandations. Le Tableau 2.1 synthétise leurs principes.

Nous avons constaté que différents types d'informations peuvent être utilisés : informations extraites des bases de données, informations venant des connaissances des experts du domaine (ontologie), l'historique des activités des utilisateurs, leurs retours de satisfaction ou d'évaluation, autres informations collectées à partir des sites que les utilisateurs ont visités, ou à partir des réseaux sociaux.

Pour faire des recommandations, certaines approches se basent sur la similarité entre les informations entrées par l'utilisateur et les données qu'il a à sa disposition. D'autres utilisent des algorithmes tels que les algorithmes de fourmis, de la logique floue, des probabilités, des systèmes multi-agents, ou des systèmes de propagation. Ces algorithmes présentent des avantages en termes d'efficacité et de prise en compte du temps d'interaction.

Nous nous inspirons de ces différentes approches pour modéliser la notre. La majorité des approches que nous avons présentées ne s'adapte pas de façon continue à l'utilisateur et ce dernier ne voit pas sa trace d'exploration qui lui permettrait de comprendre pourquoi telles ou telles données ont été recommandées. De même, la plupart des systèmes de recommandation attendent une requête ou une action (sélection ou interaction) de l'utilisateur pour faire une recommandation. Pourtant, il peut être intéressant de faire des recommandations de manière continue, sans nécessairement attendre une requête explicite de l'utilisateur de façon à l'aider, qu'il soit en train d'hésiter ou en train de consulter de façon détaillée telle ou telle donnée. Le tout étant d'adapter la recommandation à l'évolution de ses comportements pour aller vers notre notion d'interface co-évolutive.

Ainsi, la grande préoccupation des chercheurs dans le domaine de l'exploration de données est de pouvoir concevoir des modèles permettant une adaptation dynamique de l'interface aux niveaux des contenus et des modalités d'échange d'information entre le système et l'utilisateur. Nous allons voir dans la section 2.3 différentes approches sur l'adaptabilité des systèmes à l'utilisateur.

Synthèse

Les systèmes de recommandation peuvent être groupés en trois catégories selon les modèles qu'ils implémentent : les systèmes basés sur les modèles de données, les systèmes basés sur les modèles utilisateurs et ceux qui sont basés sur les deux modèles que nous appelons systèmes de recommandation hybrides. L'idée principale des systèmes de recommandation est de récupérer les informations qui conviennent le mieux à l'utilisateur selon sa requête, ses centres d'intérêt, ou ses comportements d'exploration pour mieux le guider dans sa recherche ou dans son exploration. Les systèmes de recommandations peuvent être évalués en fonction de la pertinence des informations qu'ils récupèrent à partir des ressources qu'ils ont à leur disposition, de la qualité de guidage de l'utilisateur, ou de la rapidité des réponses aux requêtes ou aux actions.

2.3 Adaptabilité du système à l'utilisateur

Un système est dit adaptatif lorsqu'il est capable de s'ajuster automatiquement à l'utilisateur en fonction de ses comportements ou de la situation dans laquelle il se trouve. Les systèmes adaptatifs se différencient des systèmes adaptables par le fait que ce n'est pas l'utilisateur qui définit les paramètres d'adaptation du système en le configurant selon ses préférences mais c'est le système lui même qui décide à quel moment et de quelle façon, il va s'adapter à l'utilisateur. Chittaro et al. ont proposé un système adaptable nommé *PALE* (Presentation of Adaptable LEarning materials), appliqué au domaine de l'apprentissage à distance (Chittaro, Ieronutti et Ranon 2006). Leur motivation est que la réussite ou l'efficacité des apprenants dépend de leurs préférences, de leurs capacités et des outils disponibles. Leur objectif est alors de donner aux instructeurs et aux apprenants la possibilité de configurer le système d'apprentissage. Le système est contrôlé par quatre paramètres : les techniques de visualisation de données (2D ou 3D), le type de navigation (libre ou contraignant), le type d'interaction et de présentation (outils d'interactions, absence ou présence d'agents virtuels tels que des instructeurs), la modalité d'explication ou de description (narration audio, texte et images en 2D ou 3D). Le système *PALE* intègre des informations multimédia sur l'éducation utilisant une gamme d'outils de visualisation, de présentation, d'interaction, ou de navigation et laisse les utilisateurs choisir ce qui leur permet de réaliser une meilleure interaction.

Dans le domaine des IHM (Interfaces Homme Machine), les interfaces adaptatives

sont souvent appelées « Interface Utilisateur Intelligente » [6]. Les interfaces adaptatives peuvent être classées en deux catégories : les interfaces qui adaptent leur contenu, la présentation et l'organisation des informations en fonction du profil de l'utilisateur et/ou de l'état de l'environnement et celles qui s'adaptent aux modalités des interactions face aux ressources qu'elles ont à disposition. C'est ce type d'interface que l'on nomme généralement « interfaces plastiques ». Le terme *plasticité* est inspiré de la propriété des matériaux qui se dilatent et se contractent en raison des contraintes naturelles sans se rompre. Dans le domaine des IHM, la *plasticité* est définie comme la capacité d'un système interactif à supporter des variations de contexte d'utilisation tout en préservant une certaine convivialité. Le contexte d'utilisation recouvre (Calvary et al. 2002) :

— les plate-formes physiques et logicielles pour interagir avec le système comme par exemple la taille de l'écran, ou la bande passante de réseau qui pourrait avoir des effets sur la quantité et la modalité des informations à rendre ou à transférer.

— les attributs qui décrivent l'environnement physique de l'interaction : objets, personnes et événements qui sont périphériques aux tâches en cours mais qui peuvent avoir un impact sur le système et/ou le comportement de l'utilisateur, maintenant ou dans le futur (par exemple, les conditions d'éclairage peuvent influencer la robustesse d'un système de suivi basé sur la vision, ou les environnements bruyants peuvent perturber les retours sonores).

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons aux interfaces qui s'adaptent au profil de l'utilisateur et à sa situation dans son environnement. Ce type d'interface est utilisé dans plusieurs domaines comme par exemple dans le domaine de l'aviation, la médecine, l'éducation, ou le commerce pour réduire le temps de réalisation des tâches et la charge de travail de l'utilisateur. Keeble et Macredi ont défini une interface adaptative comme une interface dans laquelle le contenu, l'apparence et le fonctionnement sont changés par elle-même en réponse aux interactions de l'utilisateur (Keeble et Macredie 2000). Il est à noter que l'objectif principal des systèmes de recommandation est de récupérer les informations considérées pertinentes par rapport aux centres d'intérêt de l'utilisateur, ils sont considérés comme un élément constitutif de l'interface adaptative. En plus de la question de la pertinence des informations à présenter à l'utilisateur relativement à ses comportements, d'autres questions de recherche doivent être considérées pour la réalisation d'une interface adaptative :

— **Quelles informations doit-on prendre en compte ?**
Cette question concerne à la fois les informations en entrée et les informations en sortie d'un système adaptatif. L'adaptation est réalisée pour un objectif précis. Selon cet objectif, un système devra prendre en compte des informations venant de

6. Il existe une conférence internationale nommée *IUI* (Intelligent User Interfaces), permettant à des chercheurs travaillant dans ce domaine à se regrouper chaque année pour présenter leur travail et pour voir les travaux des autres.

l'utilisateur ou de l'environnement par exemple, les préférences de l'utilisateur, son niveau d'expertise, son niveau de stress face à une situation, ses comportements pour la réalisation d'une tâche, ou l'état de l'environnement.
En ce qui concerne les informations à suggérer à l'utilisateur, leur quantité joue un rôle non négligeable parce que l'augmentation ou l'ajout d'information permet de lever des ambiguïtés face à une situation mais elle peut également augmenter la charge de travail ou le temps de réalisation de la tâche de l'utilisateur.

— **Comment montrer l'adaptation ?**
Certaines approches montrent leur adaptabilité via la pertinence des informations et d'autres via leur organisation et leur présentation sur l'interface d'interaction. Notons que ces deux principes d'adaptabilité peuvent être utilisés ensemble. La disposition des informations dans l'interface joue un rôle important sur la qualité de son adaptation parce qu'elle permet de présenter les liens ou les différences entre les informations comme par exemple le regroupement (distance spatiale entre les informations similaires), ou la mise en évidence des informations pertinentes.
Les modalités de présentation des informations sont également des éléments à considérer pour faciliter leur perception. Chaque utilisateur peut avoir une perception différente de certaines modalités, perception qui peut également être influencée par la tâche à réaliser.

— **Quand faut-il adapter ?**
La détermination du moment et de la vitesse de l'adaptation est un grand challenge pour les systèmes adaptatifs parce que le changement au mauvais moment ou trop rapide peut être perturbant pour l'utilisateur. Par exemple, si l'utilisateur vient de commencer son interaction, il vaut mieux attendre un peu et suivre lentement son rythme pour s'adapter à lui afin de lui faire comprendre progressivement le fonctionnement du système. Par contre, dans une situation urgente, il faut que le système s'adapte le plus vite possible pour résoudre le problème.

Nous allons donner quelques exemples d'approches permettant de répondre à ces questions.
Rothrock et al. ont proposé une interface adaptative générique implémentant des algorithmes inspirés de la biologie qui ont la capacité de modéliser des phénomènes complexes intégrant de nombreuses variables et différentes dynamiques d'évolution (Rothrock et al. 2002). Pour cette approche :

— Les informations prises en compte sont des informations sur l'interaction (trace d'interaction), sur le système (état du système et les fonctionnalités disponibles), sur l'utilisateur (son objectif, ses ressources, ses capacités et sa performance) et sur l'environnement (localisation dans l'espace, dans le temps, ou les conditions météorologiques)

— L'adaptabilité du système est montrée via les éléments suivants :
  — le contenu et la quantité d'information à présenter à l'utilisateur en fonction de son objectif, son expérience et sa charge de travail.
  — les menus, ou les principes de navigation en fonction du profil de l'utilisateur afin de réduire le nombre d'étapes nécessaires pour accomplir une tâche.
  — la répartition des tâches entre l'utilisateur et le système en fonction de la situation dans laquelle se trouve l'utilisateur (système automatique, semi-automatique, ou sous contrôle total de l'utilisateur).

— L'adaptation est réalisée à partir d'un algorithme génétique et d'un principe d'intelligence en essaim. L'algorithme génétique est utilisé pour implémenter les systèmes heuristiques à base de règles et l'intelligence en essaim sert à renforcer les éléments des systèmes à base de règles. La prise de décision est complexe et en contingence avec la capacité de l'utilisateur, ses préférences, sa situation et son but. Cette technique permet au système de décider à quel moment il faut s'adapter.

Cette approche est très riche en adaptation parce qu'elle considère non seulement le contenu ou la quantité d'informations pour s'adapter à l'utilisateur mais aussi le positionnement des informations dans l'espace, leur mise en valeur, la vitesse d'adaptation la plus convenable, ainsi que le meilleur moment pour faire des changements. Pourtant, lorsque les éléments à considérer pour l'adaptation sont nombreux, le système va avoir une quantité croissante de règles. Ceci va nécessiter une quantité importante de ressources et peut rendre le comportement difficile à maîtriser.

Une approche a été proposée dans le domaine de l'aviation, dans un contexte militaire, pour assister les pilotes en fonction de leur niveau d'anxiété (Hudlicka et Mcneese 2002). L'approche proposée se base sur les principes suivants pour faire l'adaptation :

— La détermination des informations à prendre en considération :
  — l'état affectif d'un pilote et ses croyances face à une situation donnée (exemple : son niveau d'anxiété est élevé lorsque l'avion est attaqué).
  — Les profils des pilotes qui sont identifiés à partir de leur personnalité, leur réactivité physiologique, leur méthode d'apprentissage, leur histoire individuelle et leurs préférences d'adaptation.

— Pour s'adapter à l'utilisateur, l'approche utilise trois modules : un module de prédiction d'impact, un module de sélection de stratégie et un module d'interface d'adaptation.
  — Un module de prédiction d'impact est conçu pour prédire l'influence d'un état affectif particulier ou d'un état de croyance sur la performance des tâches. Ce module utilise un système de raisonnement à base de règles.

— Un module de stratégie dont l'objectif est de choisir une stratégie compensatoire face à une situation (présentation des informations complémentaires pour diminuer le risque d'ambiguïté). Ce module reçoit en entrée des effets prédits à partir des états affectifs et les croyances pour sélectionner une stratégie compensatoire. Cette stratégie est accomplie par un système de raisonnement à base de règles.

— Un module d'interface d'adaptation qui permet d'implémenter la stratégie sélectionnée afin d'adapter l'interface à un utilisateur spécifique. Pour cela, il utilise des systèmes à base de règles afin de déterminer les informations relatives à la stratégie sélectionnée et de les présenter au niveau de l'interface. Ce module consiste également à définir la meilleure modalité de présentation des informations en fonction de leur contenu, ainsi qu'en fonction des préférences de l'utilisateur et de son rôle (analyste ou pilote).

En plus de ces modules, l'approche prend en considération les quatre niveaux de présentation suivants pour personnaliser l'interface : la mise en évidence des informations (localisation, taille, couleur, ou clignotement), l'espace occupé (au centre, ou aux coins, tout l'écran ou une partie), la notification (alarmes ou alertes de notification lors d'une insertion ou d'une modification des informations), l'importance des changements : changement global de l'interface ou changement partiel en insérant des éléments d'affichage conçus pour attirer l'attention vers un espace particulier. Puisqu'elle est appliquée dans un cadre qui demande beaucoup d'attention, l'étude de la manière pour attirer l'attention de l'utilisateur à chaque changement de l'interface joue un rôle important.

— Le moment de réalisation de l'adaptation est défini par un ensemble de systèmes à base de règles (module de prédiction, de stratégie et d'interface d'adaptation).

La particularité de cette approche se situe au niveau de l'étude et de l'analyse de la capacité mentale et émotionnelle de l'utilisateur face à une situation pour sélectionner les informations et les modalités de présentation qui lui conviennent le mieux pour assurer la réalisation d'une tâche.

Stock et al. ont proposé une approche interactive et adaptative conçue pour une visite de musée (Stock et al. 2007). L'approche proposée utilise des agents animés pour assister l'utilisateur lors de sa visite et pour attirer son attention si nécessaire. Deux types d'interfaces permettent de présenter des informations aux visiteurs, en plus de la salle d'exposition des objets : une interface stationnaire (grand écran) et des interfaces mobiles (tablettes) que les visiteurs peuvent prendre avec eux pendant leur visite. Pour s'adapter à l'utilisateur, l'approche s'appuie sur les éléments suivants : la détermination des centres

d'intérêt de l'utilisateur, la technique d'adaptation et la réalisation de l'adaptation.

— Les informations considérées sont les intérêts personnels des visiteurs qui sont déterminés à partir de leur comportement et des informations qu'ils ont consultées durant leur visite. L'utilisation des tablettes permet au système d'observer les comportements des visiteurs à partir des éléments qui peuvent être interprétés (localisation des visiteurs dans l'environnement, détection du temps qu'ils restent devant des objets, détermination des informations qu'ils ont consultées, entendues, aimées, ou ignorées, ou identification des objets qu'ils ont capturés via les caméras des tablettes).

— Pour montrer l'adaptation, l'approche génère automatiquement des vidéos documentaires et des propositions de visites en fonction des intérêts personnels des visiteurs. La génération automatique des documents se fait à partir d'algorithmes de génération de langage naturel. Les informations et leur présentation sont alors personnalisées et contextualisées en fonction des comportements et de la situation d'un visiteur dans son environnement. Chaque visiteur obtient le rapport de sa visite à la fin de sa navigation qui pourra être utilisé ultérieurement pour améliorer la qualité d'adaptation du système.

— L'adaptation se fait au moment où l'utilisateur consulte une information. Le contenu et la présentation de cette information sont personnalisés.

L'une des particularités de l'approche proposée se situe au niveau de la génération automatique des contenus des informations à présenter et de leurs descriptions pour s'adapter à l'utilisateur. Une autre particularité se trouve au niveau de l'utilisation des interfaces mobiles et des agents animés qui permettent de guider l'utilisateur.

Un environnement virtuel intelligent nommé *AdapTIVE* (Adaptive Three-dimensional Intelligent and Virtual Environment), appliqué au domaine du commerce en ligne, a été proposé dans (Santos et Osorio 2004). Cet environnement virtuel est constitué de salles qui contiennent des objets à présenter à l'utilisateur. Chaque salle a une thématique correspondant à son contenu et peut contenir d'autres salles à l'intérieur (voir Figure 2.18). Un agent virtuel est introduit dans l'environnement pour assister l'utilisateur pendant sa navigation et récupère les informations pertinentes relatives à ce dernier. Cette approche se base sur les principes suivants :

— La détermination des informations à considérer : un modèle utilisateur a été mis en place pour analyser les comportements de l'utilisateur à partir des données explicites et implicites. Les informations à présenter à l'utilisateur sont caractérisées par sa catégorie, son titre, sa description et son type de modalité (audio, texte, image).

— Le retour d'adaptation : l'adaptabilité du système se fait via le contenu et la réorganisation de l'environnement d'exploration (permutation des thématiques des salles).

Certains éléments sont enlevés ou ajoutés dans l'environnement selon leur pertinence par rapport aux centres d'intérêt de l'utilisateur. Et chaque élément peut être affiché de différentes manières (textures et couleurs selon la préférence de l'utilisateur). Cela est géré par un modèle nommé modèle de contenu. Les thématiques des salles et l'arrangement des informations dans l'environnement sont gérés en fonction du modèle du contenu et du modèle de l'utilisateur. Les comportements de l'utilisateur sont analysés en fonction de ses interactions (navigation, demande, accès, ou achat). La mise à jour du modèle utilisateur est réalisée par un système à base de règles et des facteurs de certitudes. L'approche utilise un système d'arbre de décision pour déterminer si une information appartient ou non à une thématique donnée selon ses caractéristiques. Elle implémente un algorithme de regroupement automatique des informations à partir de leurs descriptions textuelles pour les positionner dans l'environnement.
La structure et la présentation de l'environnement sont personnalisées en fonction des centres d'intérêt et des préférences des utilisateurs en ajoutant ou en enlevant des éléments dans l'environnement et en organisant les données dans l'espace.

— Concernant le moment de l'adaptation, c'est l'agent virtuel qui décide. L'adaptation se fait via son discours et une animation graphique en fonction de la connaissance de base qu'il a pour l'utilisateur et pour l'environnement et de ce qu'il a perçu (interactions de l'utilisateur). L'agent et l'utilisateur communiquent par des moyens verbaux (pseudo-langage naturel, ou discours de synthèse) ou non verbaux (animations).

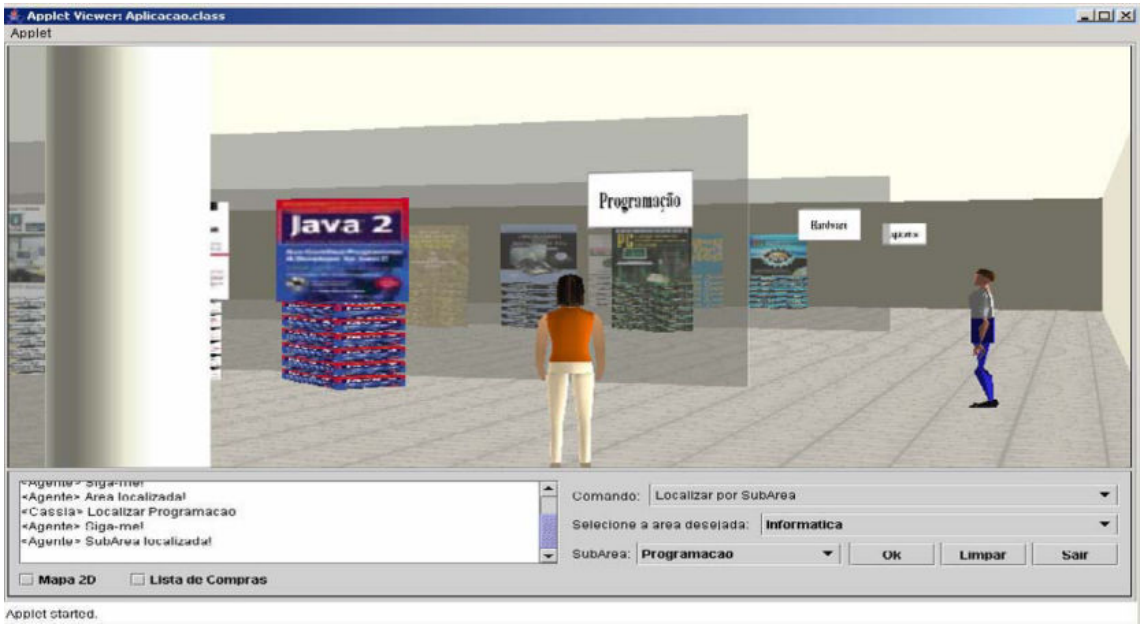


Figure 2.18 – adapTIVE (Santos et Osorio 2004)

Cette approche fonctionne comme suit : au début de son exploration, l'utilisateur choisit une thématique. Une fois la préférence de l'utilisateur et la catégorisation des infor-

mations définies, l'environnement est créé et la salle ayant la thématique préférée par l'utilisateur est placée en avant.
L'utilisateur peut interagir avec le système en sélectionnant une information pour la consulter ou pour la garder dans une liste. Il peut à tout moment enlever des informations dans cette liste. Au fur et à mesure que l'utilisateur interagit avec le système, le modèle utilisateur est mis à jour. Certaines informations seront ensuite mises en évidence, ajoutées ou enlevées de l'environnement et les salles seront réorganisées en attribuant les thématiques pertinentes aux salles qui sont proches de l'entrée. L'utilisateur peut demander à l'agent où se trouve la salle ayant une thématique donnée à partir d'une commande. L'agent peut lui montrer le plan de l'environnement en indiquant la salle demandée.

Une des limites de cette approche se situe au niveau de la définition a priori des thématiques des salles. Quand il y a un nombre important de thématiques ou un grand nombre de niveaux hiérarchiques, il devient quasi impossible de les représenter tous et même si on y arrive, cela demande beaucoup de temps pour l'utilisateur car il doit se déplacer dans de nombreuses salles. En plus, l'utilisateur risque de perdre ses repères car les reconfigurations seront d'autant plus nombreuses qu'il y aura un nombre important de salles.

Un autre système adaptatif nommé *MMA* (*Mars Medical Assistant*), appliqué au domaine de la médecine, a été proposé par Francisco-Revilla et Shipman III (Francisco-Revilla et Shipman III 2000). Le principal objectif de ce système est d'assister un utilisateur à gérer un traitement médical en lui donnant des informations adaptées au contexte, à son niveau d'expertise et à la situation dans laquelle il se trouve.

— L'approche prend en compte des connaissances médicales (explications ou descriptions), le profil de l'utilisateur (médecin ou patient), son niveau d'expertise (expert, novice, intermédiaire), les tâches à réaliser (diagnostic, procédure de guidage) ainsi que sur la situation courante (urgence, consultation normale, ou éducation).

— *MMA* se base sur un modèle utilisateur, un modèle de tâches et un modèle de situations. Chaque modèle présente des informations des modalités de présentation qu'il considère pertinentes. La résolution de potentiels conflits entre ces trois modèles s'appuie sur un système à base de règles.

— L'adaptation est réalisée à chaque demande de l'utilisateur. A partir de l'interface, l'utilisateur peut définir les informations sur la tâche à réaliser, son profil, la situation, ses préférences et son niveau d'expertise. Ensuite, le système cherche les informations et la modalité de présentation d'information qui soit la mieux adaptée.

Cette approche n'analyse pas les comportements de l'utilisateur en fonction de ses interactions mais lui demande d'entrer des informations. Ceci n'est pas toujours fiable et augmente la charge de travail pour l'utilisateur. Enfin, cette approche ne s'adapte pas de

façon dynamique.

Synthèse des approches sur l'adaptabilité

Différentes approches sur l'adaptabilité d'un système à l'utilisateur ont été présentées dans la section 2.3. Elles sont appliquées à différents domaines comme par exemple l'aviation, le commerce, la médecine, ou le patrimoine. Elles se différencient par les informations qu'elles récupèrent, les méthodes qu'elles implémentent pour étudier les comportements d'utilisateurs ou la situation dans laquelle ils se trouvent. Elles se distinguent également par les propriétés de l'interface qui peuvent être adaptées et par la détermination des moments d'adaptation. Le Tableau 2.2 donne une vision synthétique sur les principes de ces approches.

Les informations à considérer peuvent être demandées directement à l'utilisateur, ou déduites à partir du comportement de l'utilisateur et/ou de l'environnement. L'adaptation peut se situer à plusieurs niveaux (contenu d'information, organisation de l'environnement, ou vitesse d'adaptation) et l'importance de chaque niveau dépend de l'objectif de l'adaptation. La majorité des approches réalisent l'adaptation du contenu de l'interface : gestion d'espace, études des modalités de présentations, types de notification, mises en évidence des informations, regroupements des informations, quantités d'informations à présenter, ou systèmes de guidage. Il existe des approches qui travaillent sur la quantité d'informations à présenter pour ne pas trop charger l'interface ni augmenter la charge de travail de l'utilisateur mais également pour donner plus d'informations pertinentes à l'utilisateur. Tout cela a pour objectif de mieux guider l'utilisateur dans la réalisation de ses tâches. Toujours dans cet objectif, certaines approches introduisent des agents virtuels.

Les approches se distinguent également par les méthodes qu'elles utilisent pour déterminer les comportements des utilisateurs. Il y a des approches qui utilisent des systèmes à base de règles avec des facteurs d'incertitudes, d'autres qui utilisent des algorithmes d'apprentissage comme les algorithmes génétiques. Il existe aussi des approches qui se basent sur l'évaluation des pertinences des informations en fonction des interactions de l'utilisateur.

Certaines approches considèrent la vitesse comme une propriété importante de l'aspect adaptatif pour que l'utilisateur ne perde pas le contrôle du système. Il est alors important de définir le moment opportun pour faire des adaptations. Cela peut être déterminé de façon automatique à l'aide de règles. Pour d'autres approches, l'adaptation est faite à chaque demande ou interaction de l'utilisateur.

Synthèse

Pour s'adapter à l'utilisateur, un système doit récupérer des informations sur celui-ci et sur son environnement. L'importance de la nature et du contenu des informations à récupérer dépend de l'objectif à réaliser. Ces informations doivent être interprétées pour faire une adaptation. L'adaptation peut se faire à plusieurs niveaux. La majorité des approches modifient l'interface et/ou le contenu qu'elles représentent. Elles diffèrent par les instants auxquels cette adaptation est réalisée. Les approches adaptatives peuvent être évaluées en termes de perception et de compréhension de l'adaptation par l'utilisateur. Elles peuvent également être comparées en termes d'adéquation de l'adaptation à la situation, de l'efficacité du guidage qui en résulte et de la pertinence des instants auxquels est réalisée l'adaptation.

Tableau 2.2 – Tableau de synthèse des approches adaptatives

Approches	**Quelles informations à considérer ?**	**Comment ?**	**Quand ?**
(Rothrock et al. 2002)	Trace d'interaction, état du système, fonctionnalités disponibles, objectif de l'utilisateur, les ressources, ses capacités, ses performances, localisation dans le temps et dans l'espace, conditions météorologiques	Via le contenu, la quantité d'information, les menus, le niveau d'automatisation, des algorithmes génétiques et d'intelligence en essaim	En fonction de l'état du système
(Hudlicka et Mcneese 2002)	État affectif de l'utilisateur, ses croyances, les profils (personnalité, ré-activité physiologique, méthode d'apprentissage, histoire individuelle, préférences d'adaptation)	En fonction du contenu, une technique de prédiction, des systèmes à base de règles	En fonction de l'état du système
(Stock et al. 2007)	Intérêt personnel de l'utilisateur	Via le contenu, un algorithme de génération de langages naturels	A la demande de l'utilisateur
(Santos et Osorio 2004)	Comportements de l'utilisateur (information implicite et explicite)	A partir du contenu, la structure de l'environnement, un système à base de règles, des facteurs d'incertitudes, du regroupement des informations	En fonction de l'état du système
(Francisco-Revilla et Shipman III 2000)	Caractéristiques descriptives et cognitives des données, niveau d'expertise de l'utilisateur, tâches à réaliser, situation d'urgence	Via le contenu, un système à base de règles	A la demande de l'utilisateur

2.4 Conclusion

Cet état de l'art a permis d'identifier les travaux existants dans les domaines que nous considérons importants pour notre travail.

Dans la section 2.1, nous avons présenté différentes approches de visualisation de données. Un des objectifs de ces approches est d'aider l'utilisateur à comprendre la structuration et les liens qui existent entre les données pour qu'il puisse guider son exploration. Un autre objectif est également de faciliter l'accès aux informations, ainsi que l'interaction de l'utilisateur avec les données. Après l'étude de ces différentes approches, nous avons constaté qu'il existe de nombreux moyens, qui peuvent être complémentaires, pour atteindre cet objectif : la mise en évidence de la nature des liens entre les données, l'utilisation de différentes techniques de visualisation, l'utilisation de métaphores ou des outils de navigation. Dans notre approche, nous nous inspirons de ces différentes techniques de visualisation et d'interaction pour aider l'utilisateur à comprendre les liens entre les données et pour faciliter son exploration.

La section 2.2 a présenté différentes approches sur la recommandation de données. Trois types d'approches ont été identifiés : les approches basées sur un modèle de données, les approches basées sur un modèle utilisateur et les approches mixant modèle de données et modèle utilisateur. Nous avons constaté que les approches hybrides sont généralement plus puissantes car elles peuvent faire le lien entre les préférences de l'utilisateur et le contenu de la base à explorer. Ceci nous a donc incité à utiliser ce type d'approche dans notre proposition. Plusieurs approches peuvent êtres utilisées pour faire des recommandations comme par exemple les systèmes de comparaisons, les approches heuristiques, les facteurs d'incertitude, les systèmes à base de règles, ou les algorithmes inspirés de la biologie. Dans le contexte de notre travail, nous avons choisi la combinaison de systèmes de comparaisons, d'approches heuristiques et d'algorithmes inspirés de la biologie pour faire des recommandations.

Différentes approches sur l'adaptabilité du système à l'utilisateur ont été présentées dans la section 2.3. Cela a permis de voir que les approches se distinguaient non seulement par les objectifs de l'adaptation mais aussi par les moyens de montrer cette adaptation à l'utilisateur. Plusieurs éléments peuvent être exploités pour montrer l'adaptabilité du système et pour aider l'utilisateur à avoir une meilleure perception de cette adaptation. Les éléments souvent considérés sont le contenu de l'interface et la vitesse d'adaptation. Nous nous inspirons de ces deux éléments pour modéliser notre approche adaptative.

II Proposition et Évaluation

3 PROPOSITION 52

3.1 Quelques approches sur l'exploration de données patrimoniales
3.2 Principes généraux de l'approche proposée
3.3 Description des données disponibles
3.4 Définition du profil utilisateur
3.5 Recommandation de données
3.6 Incarnation de données
3.7 Conclusion

4 IMPLEMENTATION 79

4.1 Application dans le cadre du projet ANTIMOINE
4.2 Application à d'autres types d'interfaces
4.3 Application à un autre domaine
4.4 Conclusion

5 EXPERIMENTATION 96

5.1 Première expérimentation : Exp_A
5.2 Deuxième expérimentation : Exp_B
5.3 Conclusion

3

PROPOSITION

Rappelons notre objectif : il s'agit de mettre en place un système énactif permettant d'aider un utilisateur à se construire un sens à partir d'un ensemble d'informations conséquentes, reliées entre elles de façon plus ou moins directe et plus ou moins explicite. La construction du sens ou «sense-making» est un concept qui vient de la théorie des organisations (Weick 1995). En science cognitive, elle est abordée par le courant de l'énaction qui trouve son origine en biologie. Comme cela a été expliqué dans le chapitre 1, ce courant considère que les représentations du monde que possède un être vivant proviennent de ses interactions avec son environnement. De plus, puisque que l'environnement est transformé par ces interactions, les représentations de cet être vivant résultent d'un processus circulaire dynamique. Il est alors possible d'utiliser le paradigme de l'énaction comme guide pour définir un environnement qui favorisera une prise de sens (De Loor, Manac'h et Tisseau 2009). Dans notre cas, l'être vivant est l'utilisateur d'un système d'exploration de bases de données et l'environnement est un environnement 3D qui constitue une incarnation de données. Dans cet environnement, l'utilisateur est considéré comme acteur de l'exploration car ses interactions peuvent changer l'environnement. Le système va évoluer de façon autonome en tenant en compte du comportement que l'utilisateur adopte lors de son parcours. C'est cette capacité d'évolution autonome qui constitue une part de l'originalité de notre proposition.

La mise en œuvre de cette approche nécessite d'une part **l'incarnation en 3D** des données afin que la structure de l'environnement 3D reflète la structure des données (relation spatiale, temporelle, ou thématique) et d'autre part **l'auto-organisation** des informations de façon à ce qu'elles puissent guider l'utilisateur et rendre les informations compréhensibles.

Cela fait intervenir trois domaines différents : la visualisation, la recommandation de données et l'adaptabilité du système à l'utilisateur. Nous avons présenté dans le chapitre 2 différentes approches qui se focalisent uniquement sur deux de ces domaines. La par-

ticularité de notre approche est qu'elle intègre les trois.

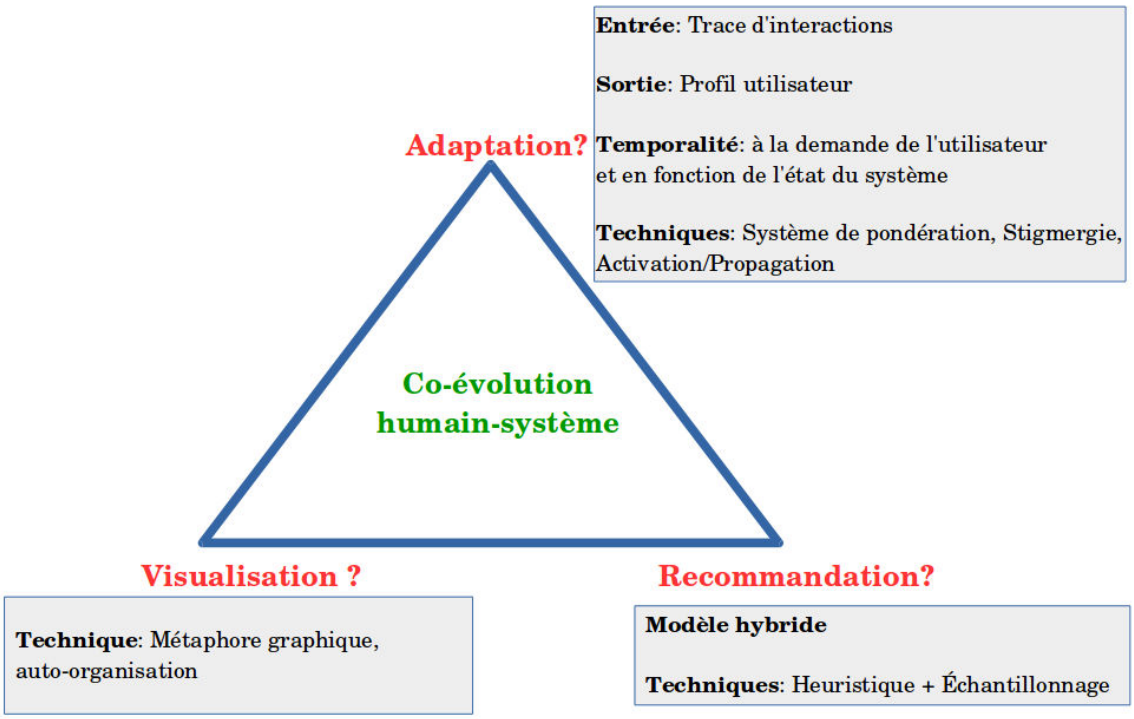


Figure 3.1 – Positionnement de l'approche proposée par rapport à l'État de l'art

La figure 3.1 présente les liens entre les différents domaines pris en compte dans notre approche ainsi que les relations entre eux. Pour s'adapter à l'utilisateur, notre approche prend en entrée la trace d'interactions de l'utilisateur. Elle considère non seulement les différentes interactions que l'utilisateur a faites mais également la dynamique de ces interactions depuis le début de son exploration, ce qui n'est pas considérée par les différentes approches présentées dans la section 2.3 (« adaptabilité »). L'évaluation de cette trace permet de définir le profil utilisateur, qui évolue au fil d'interactions. L'objectif à ce niveau est de pouvoir anticiper les intentions de l'utilisateur à un moment donné. Ce choix se base sur l'explicitation des relations implicites entre les données via la dynamique des interactions de l'utilisateur. Ce processus d'adaptabilité fait appel au système de recommandation pour récupérer les informations pertinentes par rapport au profil de l'utilisateur. Ce système utilise un modèle hybride. Sa particularité est qu'il prend en compte non seulement les intentions de l'utilisateur qui sont définies ci-dessous, mais également des connaissances a priori comme des ontologies, et le style d'exploration de l'utilisateur (exploration approfondie, ou étendue). Ce style évolue également dans le temps, en plus l'utilisateur peut avoir un style différent pour chaque catégorie d'informations (spatiale, ou temporelle, ou thématique). Les données recommandées ainsi que les relations entre elles seront ensuite incarnées en objets graphiques 3D pour avoir une meilleure visualisation. Ce type de visualisation se spécifie par la personnalisation des organisations des

données en fonction des intentions de l'utilisateur, des informations présentées par les relations entre elles, et aussi de la position de l'utilisateur dans l'environnement pour faciliter l'exploration.

Dans le cadre du projet *ANTIMOINE*, nous utilisons une base de données dédiée au patrimoine. Rappelons que l'objectif de ce projet est de faire une lecture anthropologique du patrimoine, c'est à dire une lecture qui consiste non pas à connaître tel ou tel élément du patrimoine mais plutôt à observer les multiples liens entre des multiples objets pour en extraire une compréhension globale d'un groupe d'humains. Une telle lecture peut se faire grâce à la consultation d'ouvrages, de photos, d'œuvres d'art, de documents sonores, de vidéos, de sites web, d'applications mobiles, ou de visites virtuelles. Le problème commun de ces différents média est que la perception des liens plus ou moins complexes entre les données n'est pas explicite. Il n'est également pas possible de définir un ordre ou un sens de lecture adapté à chaque personne selon ses centres d'intérêt. Afin de positionner notre travail relativement à ce cadre applicatif, nous commençons ce chapitre par la présentation de quelques approches spécifiques aux données patrimoniales.

La partie la plus importante du chapitre concerne la description de notre proposition. Nous expliquerons d'abord le fonctionnement général de la « co-évolution » entre l'utilisateur et son environnement, puis nous présentons les données disponibles, ainsi que les différents composants associés à leur formalisation permettant d'assurer le bon fonctionnement de notre approche.

Sommaire

3.1 Quelques approches sur l'exploration de données patrimoniales 56
3.2 Principes généraux de l'approche proposée 58
3.3 Description des données disponibles 60
3.3.1 Structures sémantiques 60
3.3.2 Base de données 62
3.3.3 Trace d'interaction 63
3.4 Définition du profil utilisateur 64
3.4.1 Style de navigation 64
3.4.2 Centres d'intérêt 64
3.5 Recommandation de données 69
3.5.1 Recommandation de concepts 69
3.5.2 Échantillonnage de données 70
3.6 Incarnation de données 72
3.6.1 Choix de l'environnement virtuel 3D 72
3.6.2 Éléments constitutifs de l'environnement virtuel 3D 73

3.6.3 Expansion progressive de l'environnement virtuel 3D 74
3.6.4 Auto-organisation des informations 76
3.7 Conclusion **77**

3.1 Quelques approches sur l'exploration de données patrimoniales

De nombreux organismes travaillant dans le domaine du patrimoine présentent leur données sur des sites web, comme par exemple : *Le Musée du Louvre* [1], ou *The National Gallery* [2]. Les informations sur ce type de sites sont souvent classées (par thématique, par type de données, ou par profil d'utilisateur) pour aider l'utilisateur à aller rapidement vers les informations qui l'intéressent. Il peut également faire des recherches par mots clés. Actuellement, plusieurs organismes proposent des applications qui utilisent des technologies (telles que la réalité virtuelle, la réalité augmentée, les systèmes nomades, ou les robots) afin d'améliorer la perception et les interactions de l'utilisateur avec les données.

Ces outils sont parfois évalués, comme dans (Kabassi et Maravelakis 2015). L'étude menée par ces auteurs révèle que la plupart des utilisateurs trouvaient l'interaction avec un musée virtuel très conviviale et significativement plus naturelle que l'interaction avec un site web.

Nous pouvons classer les applications qui implémentent de nouvelles technologies selon deux catégories. La première catégorie concerne les applications qui sont conçues pour faire une reconstruction d'un site touristique, tandis que la deuxième catégorie concerne les applications dédiées à l'exploration d'un inventaire, d'un fond muséographique.

Un exemple d'approche appartenant à la première catégorie est celle proposée par Prechtel et al. (Prechtel et al. 2013). Elle est appliquée au domaine du patrimoine naturel. Leur approche est dédiée à l'étude de l'évolution des paysages en utilisant des fichiers *SIG* [3] (Système d'Information Géographique) et des modèles d'environnement 3D. L'utilisateur peut accéder à des informations topographiques, historiques, ou des informations sur des enquêtes. Cela lui permet par exemple, de comparer l'évolution historique d'un paysage.

Une autre approche a été proposée pour étudier les interactions de l'utilisateur avec les objets patrimoniaux dans un environnement immersif (Gaitatzes, Christopoulos et Roussou 2001). Leur objectif, à travers la reconstitution de sites archéologiques virtuels, est de « faire vivre » l'expérience du passé à un utilisateur.

Mondou, Prigent et Revel ont proposé une approche basée sur les jeux sérieux en utilisant des robots dans un musée. L'objectif de cette approche est d'aider l'utilisateur à découvrir des informations lors de sa visite en interagissant avec un robot. Pour cela, le robot pose des questions à l'utilisateur et ce dernier va chercher les réponses dans le musée qu'il rapporte au robot. L'avantage de cette approche est que le système peut être

1. https ://www.louvre.fr/, consulté le 23/02/2018
2. https ://www.nationalgallery.org.uk/, consulté le 23/02/2018
3. https ://www.esrifrance.fr/sig11.aspx, consulté le 23/02/2018

capable de reconnaître chaque utilisateur au cours de plusieurs sessions et donc prendre en compte plusieurs utilisateurs et de donner des informations personnalisées. Avec le robot, le système de guidage pour la découverte d'information peut être rapide et efficace grâce à la combinaison des informations vocales, des gestes et des postures, voir même son déplacement dans le musée. En plus, le principe de jeux aide les utilisateurs à améliorer leur connaissance.

Notre proposition fait partie des applications appartenant à la deuxième catégorie. Damiano et al. ont proposé un environnement virtuel nommé *Labyrinth 3D* (Damiano et al. 2015) qui permet à l'utilisateur de naviguer parmi les relations sémantiques des données à travers d'objets graphiques contenus dans l'environnement. Leur idée est de s'inspirer des jeux vidéos pour faire une sorte d'exploration des objets patrimoniaux. Pour cela, la structure de l'environnement 3D fait référence à la structure sémantique des données. Les objets patrimoniaux sont exposés dans des espaces. Il existe des portes qui permettent d'accéder à d'autres espaces à partir d'un espace. Les portes sont étiquetées par des types de relations entre les salles (par exemple, leur histoire ou leur localisation). Cette proposition permet de guider l'exploration de l'utilisateur. Une de ses limites est qu'elle ne permet pas de représenter des nombreux types de relations car cela devient incompatible avec la topologie de l'environnement. Une autre limite, plus en lien à notre travail est l'impossibilité de faire co-évoluer le musée et l'utilisateur.

Une autre application a été proposée par Ma et al. (N. Ma et al. 2013) permettant d'explorer une base de données patrimoniales multi-dimensionnelles. Leur objectif est de donner à l'utilisateur la possibilité d'explorer les données selon chaque dimension (par exemple, la politique, l'économie, ou la religion) et de personnaliser le type de données à afficher et les fonctionnalités disponibles selon un profil. Cette application permet de faire des comparaisons du passé et du présent pour chaque dimension, d'explorer des informations via une carte, de naviguer entre divers types d'informations (audio, images, ou textes). L'avantage de cette application est qu'elle permet d'explorer des données patrimoniales par dimension et de personnaliser les informations en fonction du profil de l'utilisateur. Mais les profils des utilisateurs sont pré-définis (par exemple, le grand public, ou les étrangers). Même s'il y a des mises à jour de profil pendant l'exploration, la correspondance entre les données et le profil reste limitée.

Dans le cadre du projet ANTIMOINE, nous proposons un parcours d'exploration de données personnalisé et évolutif pour chaque utilisateur. Ce profil est défini par ses interactions avec les données durant son exploration, ainsi que les enchaînements de ces interactions.

3.2 Principes généraux de l'approche proposée

Rappelons que la figure 1.2 du chapitre 1 illustre le fonctionnement global de notre proposition.
L'utilisateur interagit avec son environnement pour percevoir des informations. Toutes les interactions de l'utilisateur sur cet environnement sont évaluées afin de générer de nouvelles informations estimées pertinentes à partir de ces interactions. Ces nouvelles informations sont incarnées par le biais d'objets graphiques et sont ajoutées dans l'environnement pour suggérer de nouveau des informations. L'environnement évolue de façon autonome en tenant en compte des interactions de l'utilisateur. Cette évolution peut influencer les prochaines interactions de l'utilisateur et aboutir à la construction d'un parcours personnalisé de façon incrémentale. D'où la notion de co-évolution entre l'utilisateur et son environnement.

Les questions relatives à la mise en œuvre d'une telle approche sont celles-ci :

— **(Q1)** Comment analyser les interactions de l'utilisateur ?
— **(Q2)** Comment faire évoluer un environnement d'exploration ?
— **(Q3)** Quels sont les principes de la génération de nouvelles informations ?

Nous pouvons identifier à partir de la figure 3.2 des éléments de réponse à ces questions.

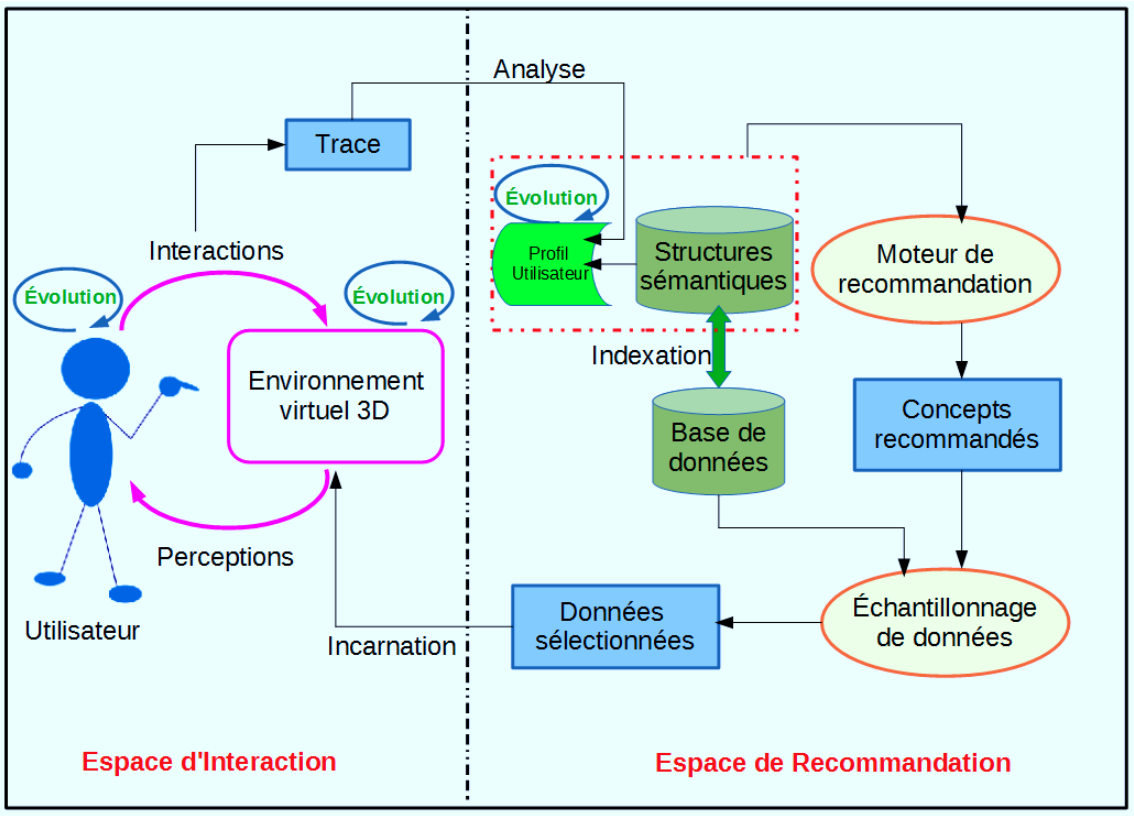


Figure 3.2 – Principe détaillé de l'approche co-évolutive pour l'exploration d'une base de données

— **(Q1)** La liste des interactions de l'utilisateur est enregistrée dans une trace. L'analyse de ces interactions se base sur les types d'actions et les enchaînements des actions que l'utilisateur a faits pendant son exploration. Cela permet de définir le **profil de l'utilisateur**. Ce profil évolue au cours du temps que des interactions se produisent ou non.

— **(Q2)** Nous adoptons une métaphore d'environnement virtuel 3D qui se construit, de façon incrémentale, à travers **l'incarnation** des éléments de données par le biais d'objets graphiques 3D. Chaque objet graphique 3D représente alors un élément de la base de données.

— **(Q3)** La génération de nouvelles informations se base sur un principe de **recommandation**. Cette recommandation utilise des connaissances a priori telles que des structures sémantiques de données et des éléments d'une base de données et utilise également des informations relatives au profil utilisateur. Les structures sémantiques sont présentées sous forme de graphes de termes que nous appelons « concepts » et les données sont indexées par un ensemble de termes. La recommandation de données se fait en deux phases : (i) la recommandation de concepts et (ii) l'échantillonnage de données. La recommandation de concepts joue un rôle très important dans notre approche car c'est elle qui assure l'adaptabilité du système à l'utilisateur, ainsi que l'évolution incrémentale de l'environnement.
L'utilisateur interagit avec des objets dans l'environnement et ces objets sont liés à des concepts. On dit que ces concepts sont consultés. Formellement, un concept c est évalué à partir de la fonction suivante :

Formule 3.2.1 Pertinence d'un concept
$P(c) = \sqrt{\alpha * degre_interet(c) + \beta * intensite(c, c^*) + \gamma * similarite_semantique(c, c^*)}$
avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$

où :
— c^* est (sont) le(s) dernier(s) concept(s) consulté(s) que nous appelons « concept focal » (« ensemble des concepts focaux »)
— α, β, et γ sont des coefficients de pondération (voir section 3.5.1)

Cette formule prend en considération trois paramètres :
— **le degré d'intérêt**
Le degré d'intérêt de l'utilisateur pour un concept, issue des différents types d'interactions qu'il a eu avec les informations liées à ce concept. Par exemple, si l'utilisateur consulte une information, le degré d'intérêt associé à cette information est moins important que s'il la sélectionne (voir cette notion dans la section 3.4.2). Il sera toutefois plus fort que si l'utilisateur passe à côté de l'in-

formation sans la consulter.

— **l'intensité des liens entre un concept et les concepts focaux**
L'intensité des liens entre des concepts dépend des enchaînements d'interactions de l'utilisateur. Lorsque deux concepts sont fréquemment consultés successivement, nous considérons qu'ils présentent des liens forts entre eux pour cet utilisateur.

— **la similarité sémantique entre un concept et les concepts focaux**.
Cette notion de similarité sera davantage explicitée en section 4.1.1.

Afin de mieux préciser ces notions, nous décrivons plus en détail dans les sections 3.3 les notions suivantes : les différentes données disponibles, la définition du profil utilisateur, la recommandation de données et l'incarnation de données.

Notre méthode de mesure de pertinence s'inscrit dans la catégorie des approches se basant sur la mesure de similarité. Pour évaluer la similarité entre deux variables $A(x_A, y_A, z_A)$ et $B(x_B, y_B, z_B)$, la mesure de similarité utilise en général sur la différence deux à deux des paramètres qui décrivent les deux variables (x, y, z). Dans notre cas, les paramètres qui permettent de définir si un concept est similaire au concept que l'utilisateur est entrain de consulter sont le degrés d'intérêt, l'intensité des liens et la similarité sémantique.

3.3 Description des données disponibles

Nous distinguons deux types de données : les données statiques telles que les structures sémantiques et la base de données et les données dynamiques telle que la trace d'interaction.

3.3.1 Structures sémantiques

Les structures sémantiques permettent de représenter des connaissances a priori relatives à un domaine. Elles sont souvent définies par des experts de ce domaine sous forme d'ontologies. Ces connaissances sont ici représentées par des graphes. Les concepts sont représentés par des nœuds et les liens sémantiques entre ces concepts par des arcs. Les structurations présentées dans ces graphes peuvent être, par exemple, spatiales, temporelles, ou thématiques. La définition 3.3.1 est une formalisation d'un ensemble de structures sémantiques.

Définition 3.3.1 Structures sémantiques de données

Supposons que nous ayons N structures sémantiques, l'ensemble des structures sémantiques est défini par :

$SS = \{ss_1, ss_2, ..., ss_N\}$ où chaque $ss_i \in SS$ est un graphe défini par :

$ss_i = (C_{ss_i}, Arc_{ss_i})$ avec

- C_{ss_i} ensemble des nœuds du graphe ss_i, chaque nœud représente un concept du ss_i.
- Arc_{ss_i} ensemble des arcs du graphe ss_i. Chaque arc relie deux et seulement deux concepts.

  $\forall\ arc\ \in Arc_{ss_i}, \exists\ c_u\ , c_v$ tel que $arc = (c_u\ , c_v)$ et $c_u,\ c_v \in C_{ss_i}$

La figure 3.3 illustre un exemple de structure sémantique appliqué au domaine du patrimoine.

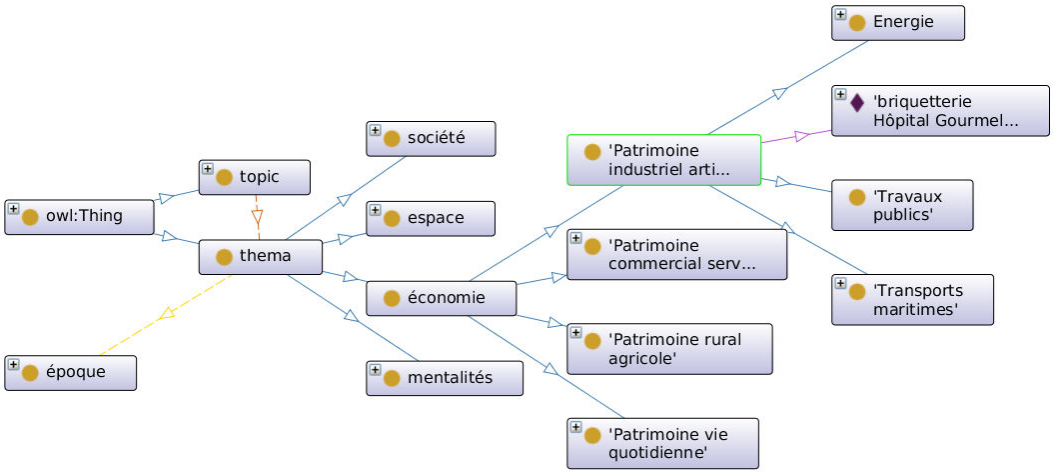


Figure 3.3 – Un extrait d'exemple de structure sémantique appliquée au patrimoine (source TOPIC-TOPOS)

Nous utilisons différents types de mesures tant sur les concepts que sur les arcs : le degré d'intérêt d'un concept, la similarité sémantique, l'intensité des liens et le chemin entre deux concepts.

- **Degré d'intérêt**

  Dans chaque structure sémantique, tous les concepts sont associés à un degré d'intérêt, noté ω (voir Formule 3.4.1). La valeur du degré d'intérêt d'un concept est comprise entre 0 et ω_{max}. Plus la valeur $\omega(c)$ est proche du ω_{max}, plus le degré d'intérêt de l'utilisateur pour le concept c est élevé.

- **Intensité des liens entre des concepts**

  Comme cela a été indiqué dans la section 3.2, nous adoptons l'hypothèse suivante :

des concepts consultés successivement par l'utilisateur ont des liens forts entre eux, pour cet utilisateur. Ce lien est défini par une fonction Φ (voir Formule 3.4.4) et sa valeur est comprise entre 0 et Φ_{max}. Deux concepts peuvent alors avoir un lien fort alors qu'ils ont une similarité sémantique faible (voir Figure 3.4). Cette technique permet de prendre en considération les liens définis implicitement par l'utilisateur par l'intermédiaire de ses interactions dans l'environnement.

— **Similarité sémantique**
La similarité sémantique est définie par une fonction Γ qui est dépendante de la nature des concepts représentés par chaque structure sémantique. Par exemple, dans la dimension spatiale, la similarité sémantique peut être définie selon un découpage administratif d'un territoire. Sa valeur est normalisée et est comprise entre 0 et Γ_{max}. Plus la valeur du $\Gamma(c_1, c_2)$ est élevée, plus les concepts c_1 et c_2 sont proches sémantiquement.

— **Chemin**
Un arc (c_i, c_j) est une relation directe entre les deux concepts c_i et c_j tandis qu'un chemin Ch_{ij} est un chemin de coût minimal permettant de joindre c_j à partir de c_i. On note $|Ch_{ij}|$ le nombre d'arcs qui constituent l'ensemble Ch_{ij}

3.3.2 Base de données

On dispose d'une base de données. Chaque élément de cette base de données est caractérisé par des textes descriptifs, des images, des fichiers audio, ou des vidéos. Les données sont indexées par des concepts appartenant à des structures sémantiques.

Définition 3.3.2 Données
Nous considérons qu'une donnée d est caractérisée par un ensemble de concepts noté C_d et par d'autres paramètres qui dépendent des ressources à disposition (par exemple, des images, ou des textes). Notons $Autres$ l'ensemble de tous ces paramètres. Chaque élément d d'une base de données est alors défini par :
$d = (C_d,\ Autres)$ tel que $C_d = \{c_i | c_i \in C_{ss_1} \cup C_{ss_2} \cup ... C_{ss_N}\}$.

Le Tableau 3.1 présente quelques exemples de données patrimoniales. Dans le cas de la base de données de l'entreprise Topic-Topos, chaque élément de base de données est caractérisé par les concepts suivants : la commune, la datation et les thématiques.

Tableau 3.1 – Exemple de données patrimoniales

Jean François Le Deist de Botidoux

source : Tigris/Flohic Editions, œuvre collective
Latitude : 48.2770239976698
Longitude : -2.82812118530273
Commune : Saint-Hervé
Thématiques : Chouans, Député, Avocat, Homme de lettre
Datation : $XVIII^{e}$ siècle

Description : Jean François Le Deist de Botidoux (1762-1823), avocat et homme de lettres, publie en 1788 un ouvrage dit Mémoire de Botidoux, dans lequel il demande à Louis XVI d'écouter les doléances du peuple. Ce mémoire sert de référence pour la rédaction des cahiers de doléances du canton. Élu député du Tiers aux États généraux de 1789, il participe au club des Girondins. Refusant certains excès de la Révolution, il se tourne vers la chouannerie du Morbihan. Le 2 décembre 1794, il signe avec Boishardy et le général Hoche le traité de La Mabilais. Il enseigne à l'école centrale de Saint-Brieuc, puis sous l'Empire, privé de son emploi, il se consacre à la traduction de textes d'Horace et de César. Pendant la Restauration, il siège à la Chambre des pairs.

Tours d'entrée de Brest

source : Tigris/Flohic Editions, œuvre collective
Latitude : 48.385499
Longitude : -4.488173
Commune : Brest
Thématiques : Musée, Prison, Tour
Datation : XV^{e} siècle
Parent : Château de Brest

Description : En 1464, un puissant portail encadré de deux tours semi-circulaires couronnées de mâchicoulis et coiffées de toits en poivrière complète le dispositif. Un ensemble de défenses extérieures, un ravelin et un fossé protègent l'entrée. À la fin du XV^{e} siècle, le château, doté d'une très forte artillerie et d'une garnison nombreuse, protège la région contre d'éventuelles incursions anglaises. Les tours, perdant au fil des années leur caractère défensif, servent de casernes et de prison, avant d'abriter le Musée naval. (Cl. M. H. 1923)

3.3.3 Trace d'interaction

La trace d'interaction contient la liste des actions que l'utilisateur a réalisées depuis le début de son exploration. Son contenu évolue alors en accord avec l'exploration de l'utilisateur. Un exemple de trace d'interaction est présenté dans l'annexe D.
L'utilisateur peut interagir avec tous les éléments graphiques qui constituent l'environnement. Ces éléments graphiques sont l'incarnation d'éléments de la base de données ou des méta-données (combinaison des concepts). Pour chaque élément de l'environnement, il existe différents types d'actions que l'utilisateur peut réaliser. Ces types d'actions sont définis selon la métaphore de navigation choisie pour la mise en œuvre de l'environ-

nement.

Définition 3.3.3 Modèle de trace d'interaction
La trace d'interaction est définie par *Trace* $= \{x | x$: une interaction$\}$
Chaque interaction x est définie par : $x = (t_x , type_x , C_x)$ où :
- t_x est le moment auquel l'interaction x a été réalisée
- $type_x$ est le type de l'interaction x
- C_x est l'ensemble des concepts relié à un élément de l'environnement virtuel 3D avec lequel l'utilisateur a interagit au moment t_x

3.4 Définition du profil utilisateur

Le profil utilisateur est décrit par deux facteurs fondamentaux : son **style de navigation** et ses **centres d'intérêt**. Le style de navigation correspond à la façon dont les données sont explorées. Tandis que les centres d'intérêt d'un utilisateur sont définis par les degrés d'intérêt et l'intensité des arcs que cet utilisateur a contribué à faire évoluer.

3.4.1 Style de navigation

Le style de navigation est défini par la similarité sémantique moyenne des derniers concepts consultés. Nous considérons deux types d'utilisateurs : ceux qui raffinent leur exploration sur une information particulière et ceux qui découvrent souvent des informations diversifiées. Cette idée est similaire à celle que proposent Athukorale et al. dans (Athukorale et al. 2016). Ces auteurs ont proposé un moteur de recherche qui s'adapte en fonction de ces deux styles de navigation. Dans notre approche, un utilisateur peut avoir des styles différents d'une structure sémantique à une autre et ces styles peuvent changer à tout moment. Par exemple, un utilisateur peut s'intéresser à un territoire particulier (raffinement) et à différentes périodes de temps remarquables sur ce territoire (exploration). Un utilisateur raffine son exploration lorsque la similarité sémantique entre les derniers concepts consultés est élevée, sinon, il découvre plusieurs informations qui ne sont pas proches sémantiquement.

3.4.2 Centres d'intérêt

Les centres d'intérêt d'un utilisateur sont définis à partir des degrés d'intérêt des concepts et des intensités des arcs des structures sémantiques qui sont mises à jour en fonction des interactions, des enchaînements de celles-ci et du temps.

1. **Analyse des interactions**
   Puisque les éléments graphiques de l'environnement sont des incarnations des données qui sont caractérisées par des concepts, toutes les interactions de l'utilisateur dans l'environnement sont reliées à des concepts.
   Supposons que l'utilisateur a fait une interaction $x = (t_x, type_x, C_x)$. L'évolution des

degrés d'intérêt des concepts dans C_x est formalisée par la formule 3.4.1. On représente le degré d'intérêt d'un concept c à l'instant t par $\omega(c,t)$.

Formule 3.4.1 Mise à jour des degrés d'intérêt via des interactions
La mise à jour des valeurs des degrés d'intérêt des concepts dépend du type de l'interaction :

- Si l'interaction de l'utilisateur indique un intérêt sur les concepts C_x.
  Alors, $\forall c \in C_x\ ,\ \omega(c,t) = \omega(c,t-1) + \lambda(\omega_{max} - \omega(c,t-1))$

- Si l'interaction de l'utilisateur indique un désintérêt sur les concepts C_x.
  Alors, $\forall c \in C_x\ ,\ \omega(c,t) = \omega(c,t-1) - \lambda(\omega(c,t-1) - \omega_{min})$

avec ω le degré d'intérêt du concept c et λ le taux d'augmentation ou de diminution de degré d'intérêt.

Elle dépend d'un paramètre λ qui est spécifique à chaque type d'interaction. Nous présentons ici deux cas possibles : dans le premier, l'utilisateur consulte rapidement une information (type d'interaction 1) et dans le second, il garde l'information pour pouvoir y accéder facilement plus tard (type d'interaction 2). Les valeurs de ses degrés d'intérêt sont différentes dans les deux cas. Il montre beaucoup plus d'intérêt sur l'information dans le deuxième cas que dans le premier. Par conséquent, λ_1 est inférieur à λ_2.

Afin de prédire les prochains concepts utilisés dans le processus de recommandation, nous faisons l'hypothèse suivante : les concepts sont d'autant plus pertinents qu'ils sont sémantiquement proches des derniers concepts consultés. Cela se traduit par une augmentation du degré d'intérêt de concepts. Néanmoins, pour éviter la saturation des concepts en terme de degré d'intérêt, nous nous inspirons du **principe d'activation-propagation** associé à celui de **la conservation d'énergie** pour diffuser des degrés d'intérêt aux voisins des concepts ayant un degré d'intérêt élevé. Nous avons identifié en section 2.2.3, des approches similaires à la notre en terme d'utilisation du système d'activation-propagation dans des structures sémantiques : celles proposées dans (Bonis et al. 2013) et dans (Gao, Yan et M. Liu 2008).

Dans notre cas, nous supposons que les concepts ont deux états possibles : actif ou passif. En se référant au système d'activation-propagation, un concept actif propage des degrés d'intérêt à ses voisins. Dans notre approche, nous avons un système qui permet de vérifier de façon périodique si le degré d'intérêt d'un concept est supérieur à un seuil. Si c'est le cas, nous le considérons comme concept actif. Il propage alors une partie de ses degrés d'intérêt à ses voisins directs.

Afin de maîtriser l'évolution des degrés d'intérêt dans une structure sémantique, nous nous inspirons du système de conservation d'énergie[4]. Selon ce principe, l'énergie est conservée lors de toute transformation. Ainsi, la valeur totale des degrés d'intérêts reçus par les voisins d'un concept actif est égale au total de ceux qui sont soustraits à ce concept. La relation entre la quantité de degrés d'intérêt distribués à ces voisins par un concept actif et ce qu'il a reçu auparavant est donnée par la formule suivante :

Formule 3.4.2 Mise à jour de degré d'intérêt via un système de propagation
Supposons que c soit un concept actif et $V(c)$ l'ensemble des voisins de c dans une structure sémantique. Alors,
$diff = \omega(c,t) * \tau$ avec τ est le taux de diffusion
$\forall c_i \in V(c), \omega(c_i,t) = \omega(c_i,t-1) + \frac{diff}{|V(c)|}$
$\omega(c,t) = \omega(c,t-1) - diff$

$\forall c_i \in V(c)$, si $\omega(c,t) > \omega_{max}$, alors $\omega(c,t) \leftarrow \omega_{max}$
Si $\omega(c,t) < \omega_{min}$, alors $\omega(c,t) \leftarrow \omega_{min}$

Nous avons également adopté l'hypothèse suivante : si l'utilisateur n'interagit pas avec un concept pendant un certain temps, le degré d'intérêt de ce concept diminue petit à petit au fil du temps. La valeur du degré d'intérêt de tous les concepts dans les structures sémantiques diminue régulièrement selon la formule suivante :

Formule 3.4.3 Mise à jour des degrés d'intérêt par un système d'oubli
$\forall ss \in SS, \forall c_i \in ss$, alors, $\omega(c_i,t) = \omega(c_i,t-1) - \eta(\omega(c_i,t-1) - \omega_{min})$ avec η est le taux de diminution de degré d'intérêt à cause de l'oubli.

Ce processus est synchrone.

2. **Analyse des enchaînements des interactions**

Nous adoptons l'hypothèse que les enchaînements des interactions permettent de renforcer l'intensité des liens entre deux concepts. Pour cela, les concepts qui sont consultés lors de deux interactions successives peuvent avoir des liens forts entre eux, selon le point de vue de l'utilisateur. Deux concepts peuvent alors avoir un lien fort alors qu'ils sont distants dans leur structure sémantique (voir Figure 3.4).

Pour mettre en œuvre cette hypothèse, nous nous inspirons du principe d'auto-organisation qui apparaît dans les algorithmes d'optimisation par la colonie de fourmis (Dréo et Siarry 2003). Selon ce principe, on considère qu'une fourmi qui se déplace dans son environnement pour chercher de la nourriture dépose des phéromones. Cela permet de renforcer son chemin et d'inciter les autres fourmis à la

4. https ://www.universalis.fr/encyclopedie/thermodynamique-thermodynamique-technique/

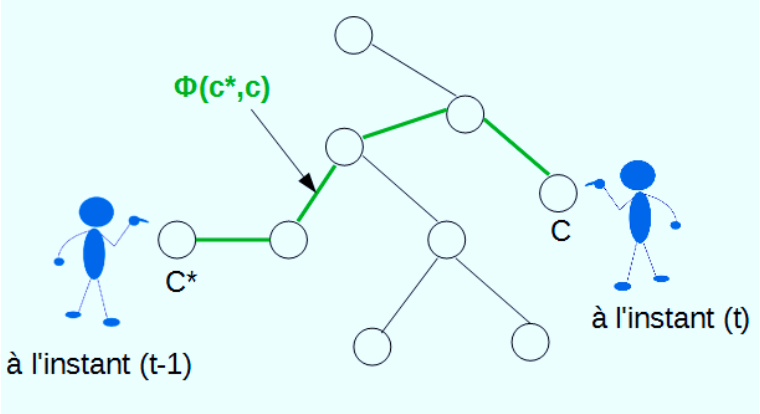


Figure 3.4 – Système de renforcement des arcs

suivre. Si un chemin n'est pas emprunté pendant un certain temps, les phéromones s'évaporent. Quelques approches présentées dans l'état de l'art utilisent ce principe pour faire de recommandation (Y. J. Yang et C. Wu 2009) (Z. Chen et al. 2010) (voir section 2.2).

Dans cette métaphore de calcul, une fourmi représente un utilisateur et les chemins les liens qui relient les concepts dans les structures sémantiques. Nous retenons de ces algorithmes l'utilisation des phéromones. La navigation de l'utilisateur dans les structures sémantiques est contrôlée en partie par ces phéromones afin de mettre en place un principe de stigmergie (Dorigo, Bonabeau et Theraulaz 2000). Les phéromones sont représentées par l'intensité des liens qui relient les concepts. Cette technique ne peut être appliquée que sur des concepts appartenant à une même structure sémantique.

Supposons que l'utilisateur ait interagi avec l'environnement selon deux interactions successives : $x_1 = (t_{x_1}, type_{x_1}, C_{x_1})$ et $x_2 = (t_{x_2}, type_{x_2}, C_{x_2})$
Alors, pour chaque concept c_i dans C_{x_1} et pour chaque concept c_j dans C_{x_2} qui appartiennent à une même structure sémantique, les chemins qui les séparent sont renforcés. La force d'un arc « arc » de la structure sémantique à l'instant t est représentée par la fonction $\Phi(arc, t)$.

Formule 3.4.4 Mise à jour des intensités via un principe de renforcement
$\forall c_i \in C_{x_1}, \forall c_j \in C_{x_2}$, tel que $c_i, c_j \in C_{ss}$,
$\forall arc \in Ch_{ij}$,

$$\Phi(arc,t) = \begin{cases} \Phi(arc,t-1) + \frac{Q_{Ph}}{|Ch_{ij}|} & \text{si } \Phi(arc,t-1) \leq \Phi_{max} \\ \Phi_{max} & \text{sinon.} \end{cases}$$

Si $\Phi(arc,t) > \Phi_{max}$, alors $\Phi(arc,t) \leftarrow \Phi_{max}$

avec :

— Ch_{ij} est le chemin permettant d'aller de c_i vers c_j dans une structure sémantique donnée ss.
— Q_{Ph} est la quantité de phéromones à déposer sur le chemin Ch_{ij}
— $\Phi(arc,t)$ est l'intensité de force de l'arc arc. Rappelons que la valeur du Φ de tous les arcs est comprise entre 0 et Φ_{max}. Si un arc atteint sa valeur maximale, lorsqu'on l'ajoute de valeur pour le renforcer, ce renforcement est ignoré.

La figure 3.5 montre un exemple de renforcement des arcs entre deux concepts (*église* et *mairie*). Ces deux concepts sont éloignés dans la structure sémantique mais ils présentent des liens forts entre eux pour l'utilisateur.

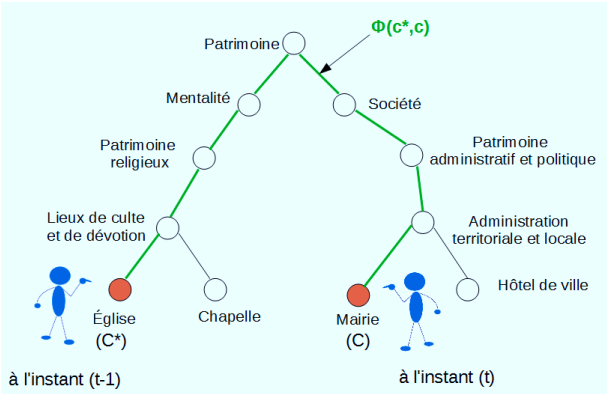


Figure 3.5 – Exemple de renforcement des arcs entre deux concepts

Nous adoptons l'hypothèse que si un arc n'est pas emprunté par l'utilisateur pendant un certain moment, son intensité diminue (les phéromones s'évaporent). Dans ce cas, nous avons un système qui s'exécute à chaque période de temps permettant de diminuer l'intensité de tous les arcs dans toutes les structures sémantiques par un taux de diminution τ.

Formule 3.4.5 Mise à jour de l'intensité par un principe d'évaporation

$\forall ss \in SS, \forall arc \in Arc_{ss}, \Phi(arc,t) = (1-\tau) * \Phi(arc,t-1)$

Si $\Phi(arc,t) < \Phi_{min}$, alors $\Phi(arc,t) \leftarrow \Phi_{min}$

3.5 Recommandation de données

La recommandation de données consiste à récupérer des informations considérées pertinentes d'après les interactions de l'utilisateur afin de les ajouter dans l'environnement virtuel 3D. Pour cela, nous utilisons une approche hybride (voir section 2.2.3) qui se base sur la combinaison :

— des **modèles de données** : le contenu de la base de données et les structures sémantiques utilisés pour annoter les éléments de cette base.

— d'un **modèle utilisateur** : il décrit le style de navigation de l'utilisateur (exploration ou raffinement), ainsi que la façon dont ses degrés d'intérêt se distribuent sur les structures sémantiques.

La recommandation de données se fait en deux phases : la recommandation de concepts et l'échantillonnage de données correspondant aux concepts recommandés.

3.5.1 Recommandation de concepts

Pour faire une recommandation, tous les concepts de chaque structure sémantique sont évalués au moyen d'une fonction qui calcule leur pertinence. La formule suivante est une instance de ce que nous avons défini au niveau de la section 3.2 :

Formule 3.5.1 $P(c,t) = \sqrt{\alpha * \exp^{2*\omega(c,t)} + \beta * \exp^{2*\Gamma(c,c^*)} + \gamma * \exp^{2*\Phi(c,c^*)}}$

avec $\alpha + \beta + \gamma = 1$

Rappelons que :

— c^* est le concept focal ou un ensemble des concepts focaux

— α, β, et γ sont des coefficients de pondération définis en partie en fonction du style de navigation de l'utilisateur à un moment donné. α étant fixé et le style de navigation de l'utilisateur est identité à partir des interactions précédentes :

  — **exploration** : les phéromones prédominent dans la recommandation ($\beta \leq \gamma$)

  — **raffinement** : les distances sémantiques prédominent dans la recommandation ($\beta \geq \gamma$)

  Exemples de valeurs :

  — exploration : (α , β , γ) = (0.4 , 0.1 , 0.5)

  — raffinement : (α , β , γ) = (0.4 , 0.5 , 0.1)

La formule de calcul de P est inspirée de la mesure d'une distance euclidienne dans un espace à trois dimensions. Dans cette formule, les trois dimensions sont le degré d'intérêt (ω), la similarité sémantique (Γ) et l'intensité de liens (Φ). Nous avons normalisé les valeurs de ω, Γ et Φ ($0 \leq \omega \leq 1$, $0 \leq \Gamma \leq 1$, $0 \leq \Phi \leq 1$). La fonction exponentielle est utilisée pour maximiser la différence entre les valeurs de ces trois dimensions. Le choix de la fonction exponentielle est empirique. Pour une structure sémantique donnée, le concept de valeur de pertinence maximale P_{max} est recommandé si $P_{max} \geq P_s$ où P_s est un seuil dé-

fini a priori. L'ensemble des concepts recommandés contient les recommandations faites pour chaque structure sémantique. Le détail du processus de recommandation est défini dans l'annexe A.

3.5.2 Échantillonnage de données

Nous avons besoin d'appliquer une technique d'échantillonnage de données pour récupérer les données correspondant aux concepts recommandés parce qu'il peut y avoir une quantité importante de données et généralement différentes pour chaque concept. De plus, la quantité de données que nous pouvons ajouter dans l'environnement est limitée.

L'échantillonnage consiste à sélectionner des individus dans une population. Les techniques d'échantillonnage de données peuvent être classées en deux catégories [5] : l'échantillonnage probabiliste et l'échantillonnage non probabiliste. Les deux catégories de techniques d'échantillonnage se différencient par le fait que dans l'échantillonnage probabiliste, chaque unité a une chance d'être sélectionnée (elle repose sur le principe de la randomisation) tandis que dans l'échantillonnage non probabiliste, on choisit arbitrairement des unités, alors il n'existe aucune façon d'estimer la probabilité pour une unité quelconque d'être incluse dans l'échantillon. L'échantillonnage probabiliste est beaucoup plus complexe et coûteux que l'échantillonnage non probabiliste. L'inconvénient de l'échantillonnage non probabiliste est qu'on ne peut estimer la variabilité de l'échantillonnage ni identifier le biais possible. L'avantage de l'échantillonnage probabiliste est qu'on peut produire des estimations fiables, de même que des estimations de l'erreur d'échantillonnage et faire des inférences au sujet de la population.

L'expérience nous a montré que l'échantillonnage probabiliste était nécessaire. Par exemple, une première version de notre approche implémentait la technique d'échantillonnage non probabiliste. Lors de l'évaluation de cette version (voir Chapitre 5), nous avons eu des retours venant des participants selon lesquels la répartition des données recommandées n'était pas équitable. C'est pour pallier à ce problème que nous avons introduit des techniques d'échantillonnage probabiliste dans une seconde version. Quelques techniques d'échantillonnage probabiliste sont envisageables :

- Échantillonnage aléatoire simple,
- Échantillonnage systématique,
- Échantillonnage stratifiée,
- Échantillonnage en grappes,
- Échantillonnage à plusieurs degrés.

Nous développerons en annexe le fonctionnement de chacune de ces techniques d'échan-

5. https ://www.statcan.gc.ca/edu/power-pouvoir/ch13/nonprob/5214898-fra.htm

tillonnage probabiliste (Voir Annexe B).

Supposant que nous avons besoin de Q quantité de données à ajouter dans l'environnement virtuel 3D, la moitié de cette quantité sont des données correspondant aux concepts recommandés et l'autre moitié sont des données correspondant aux concepts voisins des concepts recommandés. L'échantillonnage de données que nous avons appliqué se fait comme suit :

— Récupérer les concepts recommandés.
— Sélectionner toutes les données qui sont caractérisées par ces concepts recommandés pour former la population de l'échantillonnage. Notons D_1 l'ensemble de ces données.
— Appliquer une technique d'échantillonnage de données sur D_1 permettant de sélectionner $((Q-\epsilon)/2)$ éléments de la base de données où ϵ introduit des données inattendues, pour favoriser la sérendipité.
— Récupérer les concepts voisins des concepts recommandés. La notion de voisinage est définie par le nombre d'arcs qui relie des concepts dans une structure sémantique donnée. Soit R le rayon de voisinage, le concept c_1 est voisin du concept c_2 si le nombre d'arcs entre eux est inférieur ou égal à R.
— Sélectionner tous les éléments de données qui sont caractérisés par les voisins des concepts recommandés pour former une autre population d'échantillon. Notons D_2 l'ensemble de ces données. Nous avons considéré que si l'utilisateur s'intéresse à un concept, il peut être également intéressé par les voisins de ces concepts. D'où, l'idée du deuxième échantillonnage permettant de récupérer les données liées aux concepts proches des concepts recommandés. Cela permet à l'utilisateur d'élargir ces centres d'intérêts.
— Appliquer une technique d'échantillonnage de données sur D_2 permettant de récupérer $(Q-\epsilon)/2$ éléments de la base de données.
— Ajouter aléatoirement ϵ données pour favoriser la sérendipité.

L'échantillon résultant est ensuite ajouté dans l'environnement.

Deux types de signaux peuvent déclencher le système de recommandation : les signaux envoyés par l'utilisateur par l'intermédiaire de l'environnement et les signaux envoyés par le système lui même. L'utilisateur peut demander à tout moment au système de lui proposer de nouvelles informations, au moyen d'une action spécifique dans l'environnement. Il existe également un système d'envoi de signal de façon périodique au niveau de l'*Espace de Recommandation* (cet espace est défini sur la figure 3.2). Pour cela, à chaque période de temps, le moteur de recommandation reçoit un signal de demande de recommandation permettant de vérifier s'il y a de nouvelles informations à suggérer à l'utilisateur d'après ses interactions. Le moteur de recommandation donne la priorité aux demandes de l'utilisateur. Lorsqu'il est en train d'exécuter une demande de l'utilisateur,

les autres signaux sont ignorés pendant ce temps. Les seuils de valeur de pertinence appliqués pour ces deux types de demandes sont différents.

3.6 Incarnation de données

Les informations fournies par l'*Espace de Recommandation* sont incarnées au niveau de l'*Espace d'Interaction* afin que l'utilisateur puisse interagir avec elles (voir figure 3.2). En fait, nous devons procéder à l'incarnation des différents éléments :

- Les données par le biais des objets graphiques 3D.
- Les structures sémantiques par le biais d'outils de navigation.
- Les regroupements des données par le biais des emplacements d'objets.
- Les similarités entre les groupes de données par le biais d'accès ou de passages dans l'environnement.

3.6.1 Choix de l'environnement virtuel 3D

Nous adoptons un environnement virtuel 3D comme interface de visualisation et d'exploration. Ce choix repose sur plusieurs raisons :

- Nous considérons que l'utilisateur est beaucoup plus engagé dans un environnement virtuel 3D car il est immergé dans les données et il explore la base de données, non seulement en sélectionnant certains objets mais également à travers ses déplacements et de l'orientation de son regard. Les interactions avec les données sont beaucoup plus naturelles pour l'utilisateur. Il peut consulter des informations en restant face aux objets 3D qui les incarnent pendant un certain temps ou les ignorer en passant devant elles. Dans ce cas, l'utilisateur peut être considéré comme acteur de son exploration et non simple spectateur.

- En terme de visualisation de données, l'environnement 3D nous permet de réaliser et de combiner certains des avantages des techniques de visualisation identifiées dans l'état de l'art (section 2.1). D'une part, elle nous permet d'avoir une dimension en plus (la profondeur) par rapport aux interfaces standards 2D. Cela permet de mieux présenter les regroupements de données et les relations complexes entre elles, donc d'aider l'utilisateur à mieux percevoir les informations. D'autre part les environnements 3D facilitent la mise en œuvre de métaphores graphiques.

- Concernant le retour d'adaptabilité du système à l'utilisateur, l'organisation du contenu peut être également mieux exploitée dans un environnement 3D. Par exemple, l'environnement peut évoluer en ajoutant des groupes d'informations proches de là où se trouve l'utilisateur. Cette technique permet d'influencer l'utilisateur afin qu'il découvre de nouvelles informations correspondant à ses centres d'intérêt et qu'il passe facilement d'un groupe d'informations à un autre. Cela permet également d'assurer

la continuité de l'exploration et de donner la possibilité à l'utilisateur de comparer facilement des informations qui se présentent à lui. De plus, si l'utilisateur prend conscience des changements produits par ces interactions, il peut assez naturellement contrôler son exploration. L'environnement devient alors spécifique à chaque utilisateur.

— Enfin, en terme de guidage, nous considérons que l'environnement 3D permet de donner plus de repères et d'indications à l'utilisateur à partir des positions et des organisations des objets graphiques. Cela permet par exemple, de l'aider à retourner facilement vers les informations qu'il a déjà consultées s'il en a besoin. Mais surtout, il peut voir à travers l'environnement l'historique de son exploration et avoir une sorte de retour réflexif qui peut également l'aider à comprendre son propre processus de construction de sa connaissance.

3.6.2 Éléments constitutifs de l'environnement virtuel 3D

Les différents éléments constitutifs de l'environnement virtuel 3D sont : les objets, les accès, les emplacements et les outils de navigation.

— **Objet**
Un objet ou un objet graphique 3D représente un élément de la base de données. Un objet est caractérisé par sa forme, sa taille, sa texture, sa position dans l'environnement, sa position par rapport aux autres objets et surtout par les informations qu'il contient et les thématiques auxquelles ces informations sont liées.

— **Emplacement**
Un emplacement est un espace dans lequel les objets peuvent être exposés. Il peut s'agir d'un espace ouvert ou fermé. Il est caractérisé par un ensemble de concepts et sa capacité à contenir des objets. Les objets exposés dans un emplacement correspondent globalement aux concepts qui le caractérisent et sont obtenus par l'échantillonnage.

— **Accès**
Un accès est un moyen permettant d'accéder d'un emplacement à un autre.

— **Outil de navigation**
Un outil de navigation est un outil graphique permettant à l'utilisateur d'indiquer plus directement la représentation de ses centres d'intérêt. Il lui permet également de voir ce que le système lui prête comme centres d'intérêt. Il est caractérisé par sa facilité d'utilisation et sa facilité de compréhension. Une illustration de ces outils est fournie par la figure 4.4. Même si cette notion d'outil peut sembler aller à l'encontre de l'approche générale qui consiste justement à ce que l'utilisateur ne fasse pas de requêtes explicites, elle peut s'avérer parfois utile. Comme nous le verrons au cha-

pitre 5, ces outils ont d'ailleurs plus ou moins été utilisés lors de l'expérimentation et parfois mal utilisés si on considère l'objectif de co-évolution.

Définition 3.6.1 Modèle de l'environnement 3D
Le modèle de l'environnement 3D est un graphe où les nœuds représentent des emplacements de données et les arcs des accès permettant d'aller d'un emplacement à un autre.
On note cet environnement $Env = (\mathcal{E}, \mathcal{A}, \Theta)$ où :
- $\mathcal{E} = \{e | e$: un emplacement$\}$: un ensemble d'emplacements
- $\mathcal{A} = \{a | a$: un accès$\}$: un ensemble d'accès
- Θ : un ensemble d'outils de navigation

Chaque emplacement est caractérisé par un ensemble de concepts. Il peut contenir un ensemble de données qui sont extraites de la base de données. Les données contenues dans chaque emplacement correspondent globalement aux concepts qui le décrivent. Soit e un emplacement, il est définit par : $e = (C_e\ ,\ O_e,\ Q_e)$ où C_e est un ensemble de concepts qui décrivent l'emplacement e, O_e est un ensemble d'objets contenu dans cet emplacement et Q_e est la quantité maximale d'objets que peut contenir l'emplacement e.

Chaque accès a est défini par les emplacements qu'il relie, notée $a = (e_i\ ,\ e_j)$ où a permet d'accéder un emplacement e_i à partir de l'emplacement e_j et inversement.

Chaque outil θ dans Θ représente une structure sémantique. Il permet de présenter graphiquement tout ou partie de cette structuration. Soit θ un outil, on note C_θ l'ensemble de concepts présentés dans θ. Alors,
$\forall \theta \in \Theta,\ \exists ss \in SS$ tels que $C_\theta \subseteq C_{ss}$

3.6.3 Expansion progressive de l'environnement virtuel 3D

La figure 3.6 illustre l'expansion de l'environnement 3D liée au comportement d'exploration de l'utilisateur. Au début de la navigation, il y a $(n+1)$ emplacements, l'emplacement dans lequel se trouve l'utilisateur, noté e_0 et n emplacements $(e_1,\ e_2,\ ....,e_n)$ lui sont directement connectés. Cependant, ils ne sont ni disponibles ni accessibles tout de suite. La valeur n est un paramètre à définir a priori selon l'implémentation de l'environnement 3D. Les ensembles des emplacements et des accès à l'état initial sont alors définis comme suit :

Formule 3.6.1 Définition de l'environnement à l'état initial
$\mathcal{E} = \{e_0, e_1, ..., e_n\}$
$\mathcal{A} = \{(e_0, e_1), (e_0, e_2), ..., (e_0, e_n)\}$

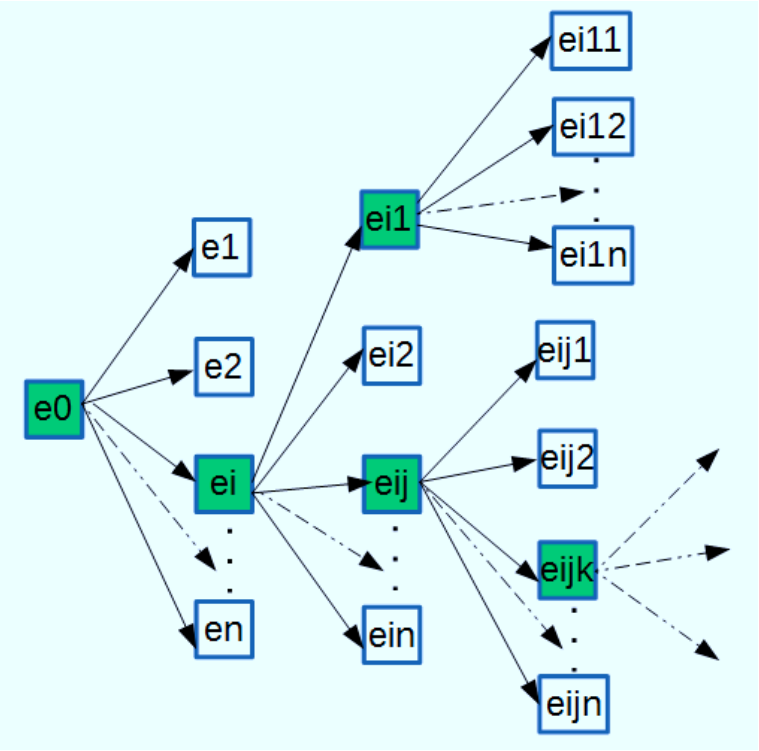


Figure 3.6 – Processus d'évolution de l'environnement 3D

Lorsque l'*Espace de Recommandation* envoie un signal de création d'emplacement, l'*Espace d'Interaction* est capable de désigner un emplacement vide proche de l'utilisateur. Ceci est alors peuplé par des objets graphiques 3D correspondant aux informations reçues. Ces objets sont positionnés dans l'emplacement choisi et l'accès vers cet emplacement est ensuite mis en évidence (par exemple par une porte qui s'ouvre). Supposons que e_i soit disponible et accessible et que l'utilisateur entre dans cet emplacement e_i, n nouveaux emplacements sont crées à côté de e_i (e_{i1}, e_{i2},...., e_{in}). Alors,

Formule 3.6.2 Définition de l'expansion de l'environnement
$\mathcal{E} \leftarrow \mathcal{E} \cup \{e_{i1},\ e_{i2},....,\ e_{in}\}$ et
$\mathcal{A} \leftarrow \mathcal{A} \cup \{(e_i, e_{i1}), (e_i, e_{i2}), ..., (e_i, e_{in})\}$

La création du graphe de l'environnement 3D va aussi progresser continuellement. Si l'utilisateur demande d'accéder à un emplacement non disponible e_{ij}, l'interface envoie un signal directement au moteur de recommandation, ce dernier sélectionne des concepts à recommander et les envoie au système d'échantillonnage de données. Le système d'échantillonnage envoie à l'interface les nouvelles données à incarner. L'interface les incarne par le biais des objets graphiques 3D et les positionne dans cet emplacement demandé e_{ij}. Lorsque l'utilisateur entre dans l'emplacement e_{ij}, n nouveaux emplacements sont crées à côté de e_{ij} (e_{ij1}, e_{ij2},..., e_{ijn}) deviennent accessibles directement à partir de e_{ij}. L'environnement 3D se forme alors en fonction des déplacements de l'utilisateur

et de ses interactions. Cette formalisation sous forme de graphe permet d'accéder à une généricité de l'approche qui peut alors être appliquée à n'importe quel environnement du moment qu'il s'appuie sur la notion de cellules et de voisinage entre cellules.

3.6.4 Auto-organisation des informations

Lorsqu'un emplacement est disponible, les objets graphiques 3D s'y auto-organisent. L'auto-organisation des objets présente un double avantage : d'une part attirer l'attention de l'utilisateur et d'autre part, l'aider à percevoir les liens sémantiques entre les données à travers leurs positions respectives dans l'espace. Cette auto-organisation des objets graphiques 3D est basée sur un système de masses+ressorts. Les positions des objets dans l'emplacement sont normalisées afin de faire entrer tous les objets dans l'emplacement tout en respectant les distances entre eux. Supposons que l'*Espace d'Interaction* rend disponible un emplacement $e = (C_e,\ O_e,\ Q_e)$, l'organisation des objets graphiques dans cet emplacement est définie comme suit :

— A l'état initial, les objets dans O_e sont positionnés aléatoirement dans l'emplacement e.

— Ensuite, ils sont reliés deux à deux par des ressorts virtuels. Tous les ressorts ont la même raideur. Soit R l'ensemble des ressorts utilisés. Chaque ressort est défini par sa longueur initiale l_0, sa raideur k, les deux objets o_i et o_j qu'il relie dans l'environnement, sa longueur finale l (longueur après la stabilité du système masse+ressort). Chaque objet o_k dans O_e est défini par les concepts qui le décrivent (C_{o_k}) et sa position dans l'emplacement ($x_{o_k}, y_{o_k}, z_{o_k}$). La longueur initiale d'un ressort est définie par la distance initiale de o_i et o_j dans l'emplacement e et une fonction nommée $Prox(o_i, o_j)$ est introduite pour définir la proximité sémantique entre o_i et o_j. La fonction $Prox$ se base sur la distance euclidienne en N dimensions (nombre des structures sémantiques utilisées) pour calculer la similarité entre deux objets. Plus la valeur de la fonction $Prox$ est petite, plus les objets sont proches sémantiquement.

— Une force de tension T_r est appliquée sur chaque ressort. Sa valeur dépend de la longueur finale souhaitée. Cette longueur est définie par la distance dans l'espace correspondant à la proximité sémantique entre les objets o_i et o_j.

— Le système de masses+ressorts consiste à positionner les objets de façon optimale pour satisfaire les contraintes introduites par le système.

Formule 3.6.3 Organisation des données via un système de masse+ressort
$\forall r \in R,\ r = (l_0, k, o_i, o_j, l)$ tels que $o_i,\ o_j \in O_e$,
$T_r = k * \Delta l = k * (l - l_0)$ où

k est une constante
$l_0 = \sqrt{(x_{o_i} - x_{o_j})^2 + (y_{o_i} - y_{o_j})^2 + (z_{o_i} - z_{o_j})^2}$ et
$l = \frac{Prox(o_i,o_j) * L_e}{\Gamma_{max}}$

où L_e est la distance spatiale maximale entre deux objets dans l'emplacement e et Γ_{max} est la distance sémantique maximale entre deux objets.

Ce type d'organisation de données ayant pour but de montrer la similarité sémantique entre les objets patrimoniaux est une des originalité de notre approche par rapport à ce qui a été vu dans l'état de l'art.

3.7 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le principe général de l'exploration de bases de données que nous proposons ainsi que sa formalisation. La particularité de notre approche est d'intégrer les comportements de l'utilisateur à travers ses interactions dans le mécanisme de recommandation. Ceci permet d'accéder à la notion de co-évolution. L'utilisateur est un acteur de son exploration. Son déplacement et ses interactions avec l'environnement lui permettent de percevoir des informations et définissent la suite de son exploration. L'environnement est également un acteur de l'exploration. Il réagit aux interactions de l'utilisateur en lui proposant des informations qui l'intéressent ou en l'influençant pour qu'il découvre de nouvelles informations qu'il n'a pas forcement pensé à explorer. L'utilisateur et l'environnement co-évoluent ensemble pour assurer la continuité et la personnalisation de l'exploration.

Pour mettre en œuvre ce principe de co-évolution, nous utilisons :

— des modèles de données et des structures sémantiques associées.
— un modèle d'interaction de l'utilisateur permettant de définir ses centres d'intérêt et son style de navigation, donc de définir son profil.
— un système de recommandation qui suggère des concepts lorsqu'il détecte des concepts pertinents ou lorsque l'utilisateur le demande.
— un système d'échantillonnage de données permettant d'avoir une quantité de données maîtrisable pour l'utilisateur tout en étant représentatives des concepts les plus pertinents pour l'utilisateur.

L'adaptation du système à l'utilisateur est représentée par la création incrémentale de l'environnement et l'auto-organisation des données dans cet environnement. Cette auto-organisation est basée sur un système de masses+ressorts. L'évolution des modèles est réalisée par la mise à jour de ces valeurs via des informations contenues dans la trace de l'interaction. Ceci est assuré par différents algorithmes : algorithme basé sur le principe

de la stigmergie, algorithme d'activation-propagation et celui basé sur principe de conservation d'énergie.

L'approche que nous avons proposée est générique. Nous allons voir dans le chapitre 4 les différentes instances de cette approche mises en œuvre pendant ce travail de thèse.

4 IMPLEMENTATION

Nous présentons dans ce chapitre les différents travaux d'implémentation que nous avons mis en œuvre. Nous expliquerons d'abord le travail réalisé dans le cadre du projet ANTIMOINE, support de la thèse. Nous développerons ensuite les éléments permettant de montrer la généricité de l'approche. Plusieurs composants de l'approche proposée permettent d'évaluer sa généricité. Des contraintes de temps nous ont amené à donner la priorité à la généricité en terme d'interface, type de données (ou de domaine) et de technique de recommandation.

Sommaire

4.1 Application dans le cadre du projet ANTIMOINE 79
4.1.1 Données à disposition . . . 80
4.1.2 Métaphore du musée virtuel vivant . . . 81
4.1.3 Éléments constitutifs du musée . . . 83
4.1.4 Types d'interactions . . . 86
4.1.5 Applications implémentées . . . 87
4.1.6 Architecture logicielle . . . 87
4.1.7 Exemple de scénario d'exploration . . . 89
4.2 Application à d'autres types d'interfaces 89
4.2.1 Interface 2D . . . 89
4.2.2 Interface immersive . . . 91
4.3 Application à un autre domaine 93
4.4 Conclusion 94

4.1 Application dans le cadre du projet ANTIMOINE

Cette section présente les données que nous avons à disposition, les raisons du choix de la métaphore d'exploration, les éléments constitutifs de l'environnement, ainsi que

les différents types d'interactions possibles. Elle illustre également les différentes versions d'applications implémentées, l'architecture logicielle de ces applications et enfin un exemple de scénario d'exploration.

4.1.1 Données à disposition

Les données utilisées comme entrées pour ce travail de thèse proviennent du projet ANTIMOINE. Nous les décrivons ci-dessous succinctement :

— **Base de données**
La base de données utilisée a été fournie par l'entreprise TOPIC - TOPOS et contient de l'ordre de 25 000 enregistrements. Chaque enregistrement décrit un objet du patrimoine au moyen des informations suivantes :
  — le(s) lieu(x) où il a été construit ou découvert, ses les coordonnées GPS de ce(s) lieu(x) (le topos),
  — les différentes dates ou périodes relatives à son histoire (le chronos),
  — les différentes catégories du patrimoine auxquelles il appartient (le théma),
  — une image, ou des hommes qui interviennent dans son histoire (voir Tableau 3.1),
  — un texte plus ou moins court qui décrit, dans un format libre cet objet (le topic).

— **Modèle de données basé sur la syntaxe**
Un premier modèle de description de la base de données, basé sur une approche syntaxique a été fourni par un des partenaires du projet. Le modèle repose sur la combinaison d'une approche statistique (extraction des motifs fréquents) et d'une approche probabiliste (« topic modeling »). Cette approche est décrite dans (Aligon et al. 2016). Ce modèle permet de :
  — lier les objets patrimoniaux et les termes utilisés dans leur description.
  — de lier entre eux des termes utilisés pour décrire des objets.
Nous ne décrivons pas plus les algorithmes utilisés, car cela est hors de propos par rapport à notre étude. Seuls les graphes de termes et les liens termes-objets sont utilisés par un moteur de recommandation.

— **Modèles de données basés sur la sémantique**
Nous avons à disposition des modèles basés sur des connaissances patrimoniales organisées selon une vision anthropologique préconisée par la société *TOPIC - TOPOS*. Nous appelons ces modèles « structures sémantiques ». Trois structures sémantiques de données sont utilisées : une structure spatiale, une structure temporelle et une structure thématique.
  — La structure spatiale définit la relation entre des communes, des départements et des régions selon le découpage administratif de la France fourni par l'INSEE [1] (Institut National de la Statistique et des Études Économiques)

1. https ://www.insee.fr/fr/information/2114819, consulté le 01 Mars 2018

— la structure temporelle définit la séquence chronologique de différentes dates importantes avec leur appartenance aux différentes périodes (Moyen Âge, Guerre de religion, ou Grands siècles)

— la structure thématique définit la structuration abstraite et détaillée des thématiques dans le contexte patrimonial. Elle présente environ 950 concepts.

La structure spatiale présente approximativement 1360 concepts, tandis que la structure temporelle a seulement une vingtaine de concepts. Sur le Tableau 3.1, chaque donnée est reliée à des concepts via ces paramètres caractéristiques tels que la commune (concept spatial), les datations (concepts temporels) et les thématiques (concepts thématiques).

Comme nous l'avons expliqué dans la section 3.3.1 concernant la mesure de la similarité sémantique, elle peut être différente d'une structure sémantique à une autre. Dans notre cas, les structures sémantiques sont de forme hiérarchique ou de type « appartenance ». Nous adoptons une fonction unique proposée par *Wu* et *Palmer* (Z. Wu et Palmer 1994) pour mesurer la similarité sémantique entre deux concepts c_i et c_j dans une hiérarchie selon la formule suivante :

Formule 4.1.1 Similarité sémantique de Wu et Palmer

$$\Gamma(c_i, c_j) = \frac{2*L(c^+,c_0)}{|L(c^+,c_i)+L(c^+,c_j)+2*L(c^+,c_0)|}$$

avec c^+ est le concept commun entre les concepts c_i et c_j dans le graphe, c_0 est la racine de la hiérarchie. La hiérarchie utilisée pour calculer la similitude est obtenue à partir d'une racine c_0 à laquelle on ajoute comme sous-arbre la structure sémantique considérée. L est le nombre minimal d'arcs entre c_i et c_j. La valeur de cette distance Γ est comprise entre 0 et 1. Plus la valeur de cette distance est grande, plus les deux concepts présentent beaucoup de ressemblance sémantiquement.

4.1.2 Métaphore du musée virtuel vivant

Nous adoptons la métaphore d'un **« musée virtuel vivant »** comme environnement d'exploration. Le choix de cette métaphore se justifie à différents titres :

— Il s'agit de présenter une collection d'objets patrimoniaux, présentation qui se fait souvent dans un musée. Pour ce musée virtuel comme pour un musée réel, plusieurs parcours sont envisageables, parcours pendant lesquels le visiteur n'a pas l'obligation de parcourir les objets selon un ordre pré-défini.

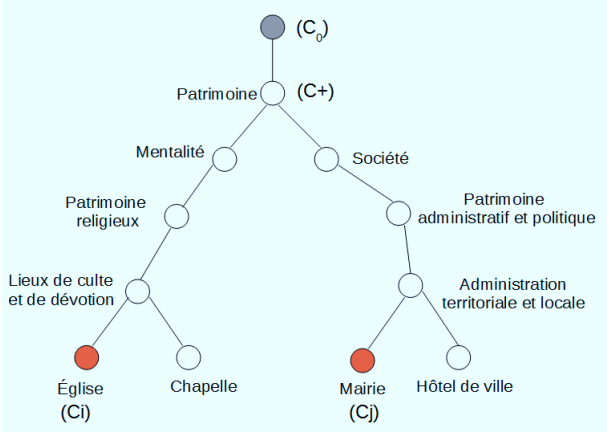


Figure 4.1 – Exemple de relation sémantique entre deux concepts

$$\Gamma(c_i, c_j) = \frac{2*1}{|4+4+2|} = 0.2$$

— Le terme « vivant » sous-entend que le musée s'accroît progressivement et qu'il réagit aux actions de l'utilisateur. Contrairement à un musée réel, sa structure n'est pas définie a priori mais, elle est définie progressivement au fur et à mesure des interactions de l'utilisateur avec le musée. Sa forme et sa structure finale sont alors spécifiques à chaque utilisateur. Cela fait partie de la technique de visualisation des données « multi-dimensionnelles » (voir section 2.1.4) parce qu'une même base de données peut être explorée de manières différentes. L'avantage de cette technique est qu'elle permet à l'utilisateur d'accéder rapidement aux informations qui l'intéressent, de découvrir de nouvelles informations et d'avoir la possibilité de faire une exploration par dimension (ou par structure sémantique dans notre cas). L'utilisateur peut contrôler son parcours. L'environnement lui laisse définir ses parcours en lui proposant plusieurs choix d'exploration. De même l'utilisateur peut voir à partir de l'environnement les résultats de ses interactions.

— Avec ce « musée virtuel vivant », les informations et les relations qui les lient peuvent être encodées par l'espace. Un objet patrimonial dans le musée peut incarner une information de la base de données. Des objets patrimoniaux appartenant à une même catégorie sémantique seront placés dans une même salle du musée. Contrairement à un musée réel, un objet peut apparaître dans plusieurs salles s'il est pertinent dans différents contextes, ce qui fait référence à la technique de visualisation « multi-vues ». Les liens entre les groupes d'informations sont représentés par des portes des salles qui permettent de passer d'une salle à une autre. L'organisation des objets dans les salles permettent de montrer les relations sémantiques entre ces objets. Cela aide l'utilisateur à la perception des informations et des relations entre elles.

— La métaphore du musée virtuel permet de mettre en œuvre des affordances qui

ont pour objet de susciter une action sur des éléments de l'environnement (Greeno 1994). Par exemple, l'ouverture de la porte d'une nouvelle salle qui vient d'être créée laisse entrevoir les données « au loin » et peut attirer l'attention de l'utilisateur. Cela pourra l'inciter à découvrir de nouvelles informations qui sont disponibles dans la nouvelle salle. Les objets proches de l'utilisateur sont mises en évidence par leur taille et leur hauteur pour également l'inciter à consulter les informations qui les concernent. En plus, tous les objets dans l'environnement s'orientent dynamiquement vers l'utilisateur et cela change en fonction de ses déplacements dans l'environnement. Nous n'avons malheureusement pas pu approfondir nos études sur cette notion d'affordances dans un environnement virtuel. Nous avons simplement utilisé quelques notions et principes qui y font référence.

— Dans ce musée virtuel, plusieurs outils de navigation sont disponibles. Ici, ils servent moins à se préparer dans l'espace muséographique qu'à définir les prochains parcours et à donner un retour à l'utilisateur quant à la façon dont celui-ci est perçu par le système de recommandation. Notons que l'utilisateur n'impose pas directement les concepts à présenter mais contribue à modifier son profil qui sera pris en compte ultérieurement par le système de recommandation. Nous adoptons la métaphore de la carte, de la frise chronologique et du nuage de mots clés pour présenter les structures sémantiques (voir Figure 4.4).

4.1.3 Éléments constitutifs du musée

Cette section présente les éléments constitutifs de l'environnement correspondant à la métaphore choisie. Rappelons que l'environnement est constitué par les éléments suivants : les objets, les emplacements, les accès et les outils de navigation. Pour la métaphore choisie, ces éléments sont instanciés comme suit :

— **Objet**
Un objet patrimonial est représenté par une image qui l'incarne (image posée sur un pupitre). L'utilisateur se déplace librement dans l'environnement 3D. En s'appro-

Figure 4.2 – Représentation graphique des objets patrimoniaux via des œuvres

chant d'un objet il se focalise sur celui-ci tout en ayant une vison du contexte de cet objet (principe de « focus+contexte »).

— **Emplacement**
Un emplacement est représenté par une salle. Elle contient au plus 16 œuvres. Chaque salle a un ensemble de concepts qui la caractérise (un concept ou une

Figure 4.3 – Représentation graphique des emplacements d'objets via des salles

combinaison de concepts de différentes structures sémantiques). Sur la figure 4.3, l'ensemble des concepts caractérisant les salles est affiché à droite de l'utilisateur pour la salle courante et au dessus des portes pour les autres salles. Dans cet exemple, les concepts caractérisant la salle où se trouve l'utilisateur sont : «*Étang, Châtelaudren,* XII^e *siècle*», appartenant aux structures sémantiques suivantes : thématique (Étang), spatiale (la commune de Châtelaudren) et temporelle (XII^e siècle). L'organisation des objets dans une salle permet de présenter les relations sémantiques qui les entretiennent comme nous pouvons voir sur la figure 4.3. Les œuvres qui sont regroupés plus à gauche de la salle sont plutôt des espaces ouverts (Étang, rivière) et les œuvres qui sont regroupés à droite sont plus des constructions (rempart, moulin à vent).

— **Accès**
Un accès est représenté par une porte qui permet d'atteindre une salle à partir d'une autre. Les salles sont alors reliées entre elles via des portes. Une porte peut être fermée ou ouverte. Lorsqu'une salle contient des œuvres, elle est accessible et sa porte est ouverte, sinon sa porte est fermée. Nous pouvons voir à partir de la figure 4.3 que certaines portes dans l'environnement sont ouvertes et d'autres sont fermées.

— **Outils de navigation**
Les outils de navigation sont représentés par une carte, une frise chronologique et un nuage de mots clés qui permettent respectivement de présenter les méta-informations et la structure entre elles aux niveaux spatial, temporel et thématique. Sur les trois premières images (a), (b) et (c) de la figure 4.4, il est possible de distinguer les informations considérées pertinentes par le système en jouant sur la taille ou la couleur des primitives graphiques qui les représentent. Plus une information est pertinente, plus sa taille devient grande et sa couleur se rapproche du vert.

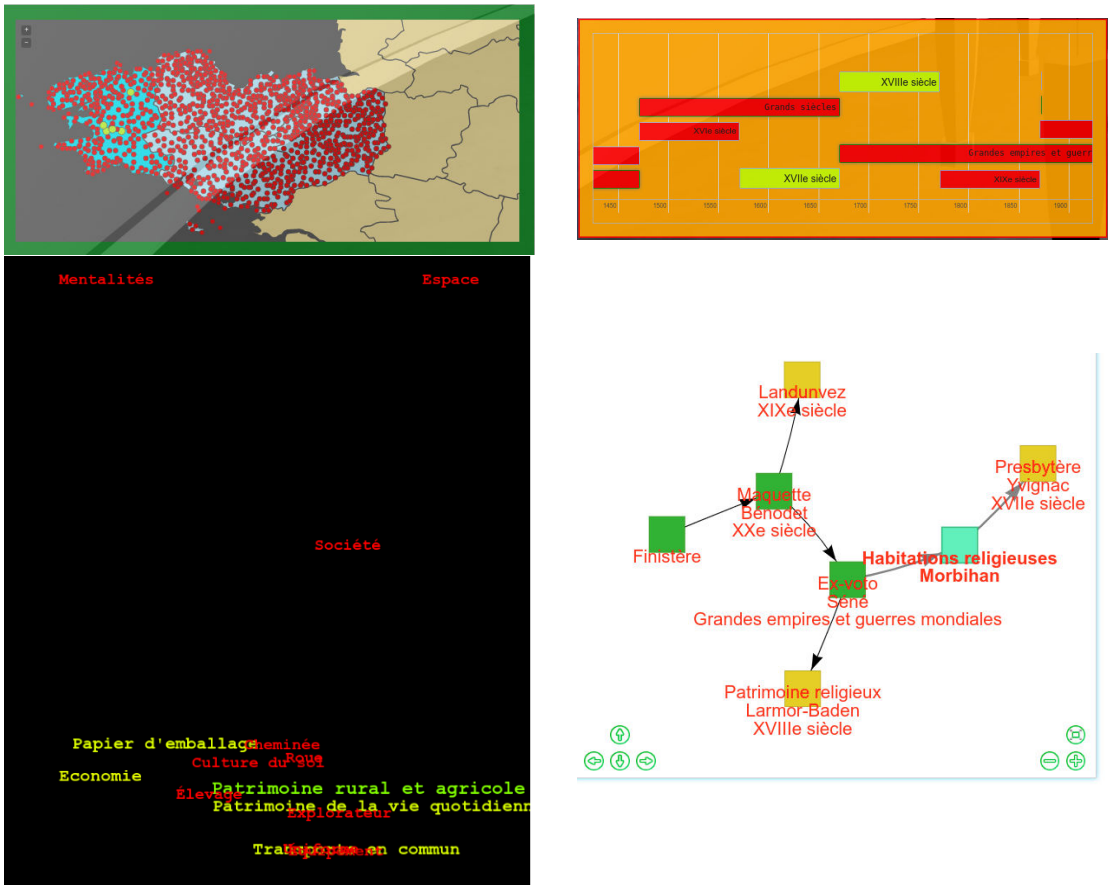


Figure 4.4 – Outils de navigation
(a) haut gauche : Carte (b) haut droite : frise chronologique
(c) bas gauche : nuage des mots clés (d) bas droite : plan du musée

En plus des trois outils de navigation liés aux structures sémantiques, l'utilisateur a aussi à disposition le plan du musée ((d) sur la figure 4.4) et un chronomètre. Le plan du musée lui permet de voir les salles qui sont créées, les salles qu'il a déjà visitées, ainsi que sa position dans le musée. Les salles sont représentées par des carrés. Les salles visitées ont une couleur verte, la salle courante a une couleur cyan et les salles non visitées ont une couleur jaune. Le chronomètre donne le temps passé dans le musée. Nous pouvons voir sur la figure 4.3 que ces différents outils sont accessibles via le menu qui se trouve

sur la partie gauche de l'interface. Tous les outils sont mis à jour en temps réel au fil des interactions de l'utilisateur. Ils ne peuvent pas être utilisés simultanément mais l'utilisateur peut en sélectionner un à tout instant.

4.1.4 Types d'interactions

L'utilisateur peut interagir avec tous les éléments constitutifs de l'environnement tels que : les objets, les salles, les portes et les outils de navigation. Le type d'interaction peut définir le degré d'intérêt de l'utilisateur sur une(des) information(s), mais peut également définir un certain degré de désintérêt. Nous avons défini 6 types d'interactions :

— Consulter les informations associées à un objet. Pour cela, l'utilisateur peut sélectionner ou se mettre devant un objet et un panneau présentant les informations concernant cet objet sera affiché (voir Figure 4.5). L'information contient les textes descriptifs de l'objet, ainsi que les concepts qui le caractérisent.

— Montrer son intérêt pour un objet en le mettant dans un panier virtuel. Cela peut être réalisé en sélectionnant le bouton vert au niveau du panneau présentant l'objet (voir Figure 4.5).

— Enlever un objet qui a été mis dans le panier. Cela peut être réalisé grâce au bouton rouge (voir Figure 4.5).

— Utiliser les outils pour sélectionner les informations qui l'intéressent. Lorsque l'utilisateur sélectionne une commune ou une région au niveau de la carte, des informations concernant l'élément sélectionné seront affichées sur un panneau. Notons que nous avons connecté certains outils à la base de données de *Wikipédia* via *dbpedia* [2]. Ainsi, l'utilisateur qui sélectionne des concepts au niveau de la frise chronologique obtiendra des informations de la base de données de *Wikipédia*. Au niveau de la frise chronologique, l'utilisateur peut sélectionner une intervalle de temps. Le retour d'une sélection au niveau du nuage des mots clés est différent. Les mots clés dont nous parlons ici sont des concepts de la structure thématique de données patrimoniales. Lorsque l'utilisateur sélectionne un mot clés, de nouveaux mots clés sont ajoutés à l'écran pour peupler le nuage. Les mots clés ajoutés sont choisis selon leur proximité sémantique avec le mot clé sélectionné. Les mots se déplacent dans l'espace et se regroupent entre eux en fonction de leur proximité sémantique. Ce système de déplacement est inspiré des algorithmes de boïds (Reynolds 1987) (Proctor et Winter 1998). Ce système de regroupement est également codé par la couleur. Lorsque l'utilisateur n'interagit pas avec certains mots clés pendant un certain temps, ils sont enlevés de leur espace.

2. http ://wiki.dbpedia.org/

— Entrer ou sortir d'une salle qui est ouverte. Notons que toutes les salles qui sont construites persistent pendant l'exploration de l'utilisateur pour qu'il ait des repères lors de son exploration.

— Ouvrir une porte qui est fermée en se mettant devant. Ce type d'interaction permet à l'utilisateur de demander au système de nouvelles informations.

Figure 4.5 – Présentation des informations sur un objet

4.1.5 Applications implémentées

Deux versions de musées ont été développées. Une version préliminaire utilise un modèle syntaxique (Rajaonarivo, Maisel et De Loor 2016) tandis que la seconde met en avant les aspects sémantiques (Rajaonarivo, Courgeon et al. 2017).

La seconde version est conçue en tenant compte des relations sémantiques contenues dans une ontologie dans le cadre du projet ANTIMOINE (voir chapitre 3). Cette prise en compte du sens conduit plus rapidement aux concepts pertinents cohérents entre eux. La limite de la première version du musée est due au fait que les termes retournés par le système de recommandation n'ont pas forcément de sens pour l'utilisateur.

4.1.6 Architecture logicielle

La figure 4.7 illustre l'architecture système du « musée virtuel vivant ». Nous avons utilisé une architecture client-serveur qui nous a permis entre autre, de déployer l'application à des fins d'expérimentation (voir Chapitre 5). Le serveur contient la base de données utilisée, ainsi que des informations relative à chaque client connecté qui sont

Figure 4.6 – Musée basé sur les modèles sémantiques de données

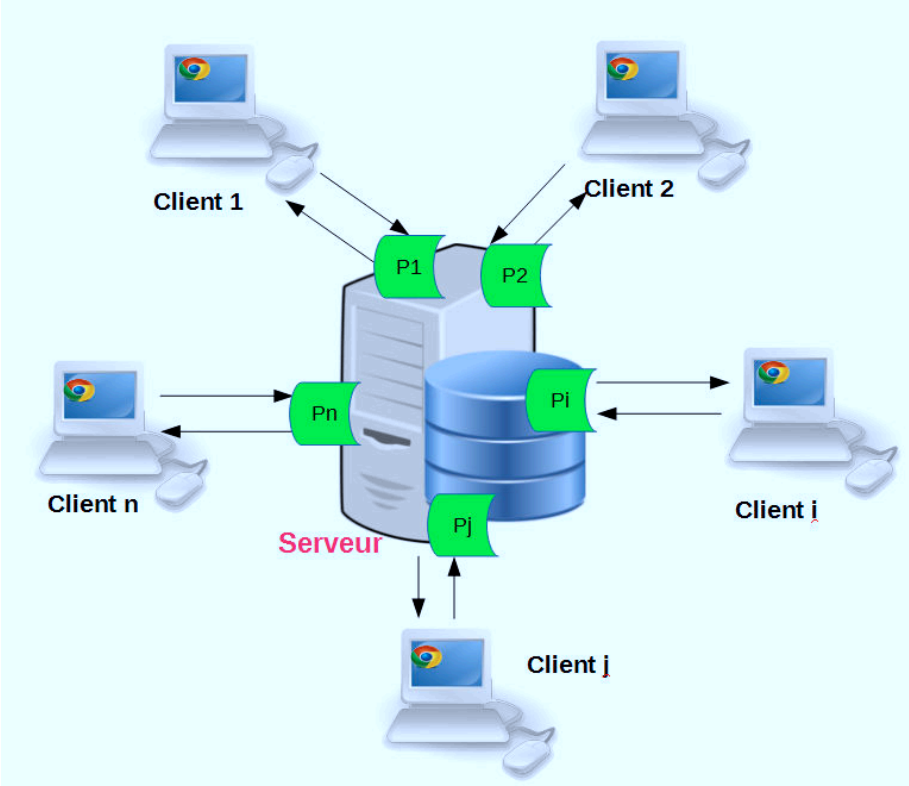


Figure 4.7 – Architecture client-serveur du « musée virtuel vivant »
P_1, P_2, ..., P_n profils correspondant respectivement aux client 1, client 2, ..., client n

enregistrées dans des fichiers (ou trace d'interaction). Chaque trace contient des évaluations des concepts dans des structures sémantiques. Ces valeurs sont obtenues et sont modifiées en ligne à partir des interactions des utilisateurs. Pour implémenter cette archi-

tecture, nous avons utilisé un serveur *Nodejs*[3].

Chaque client a besoin d'un navigateur pour se connecter au serveur et pour explorer les données. Nous avons utilisé *Babylonjs*[4] (moteur 3D en temps réel écrit en JavaScript) pour afficher l'environnement 3D au niveau du client. Seules la base de données et les structures sémantiques sont partagées entre plusieurs utilisateurs. Ce n'est pas le cas des différentes valeurs associées aux données et aux arcs de ces structures (par exemple, les phéromones). Il n'y a donc pas de parcours conçu de façon collaborative entre plusieurs utilisateurs.

4.1.7 Exemple de scénario d'exploration

La figure 4.8 illustre un exemple de début de parcours du musée, où l'utilisateur par ses interactions et ses déplacements crée différentes salles pour explorer les données patrimoniales de la base de données. On observe que toutes les salles ne sont pas nécessairement visitées, certaines pourront être ignorées et éventuellement visitées plus tard.

4.2 Application à d'autres types d'interfaces

Pour tester la portabilité de notre application en terme d'outils d'exploration, deux interfaces autres que l'interface 3D ont été développées : une interface 2D et une interface immersive. L'interface immersive a été développée par un ingénieur de recherche qui a travaillé sur le projet ANTIMOINE. Ces deux applications, ainsi que l'application 3D, utilisent le même serveur, seuls l'interface d'exploration et les modes d'interactions changent.

4.2.1 Interface 2D

L'exploration en 2D se fait à travers une page Web qui est constituée par un espace de présentation d'objets représenté par la zone grise de la figure 4.9 et des salles qui sont représentées par des vignettes. La vignette orange indique la thématique de la salle où se trouve l'utilisateur si on se réfère à l'interface 3D (« salle courante »). Les objets se trouvant dans la zone grise sont des objets correspondant à l'ensemble des concepts caractéristiques de cette salle. Les trois vignettes de couleur vert clair représentent les trois salles suivantes de la salle courante selon le graphe de l'environnement. Tandis que la vignette de couleur verte se trouvant en bas de l'espace de présentation représente la salle précédente de la salle courante. Les concepts caractéristiques de la salle visitée juste avant la salle courante s'affichent sur la vignette le plus bas de la page (salle précédente). Sélectionner une vignette signifie soit visualiser les objets correspondant à ses concepts caractéristiques, soit demander de nouveaux concepts. Lorsqu'une vignette vient d'être disponible, elle clignote pendant quelques secondes pour inciter l'utilisateur à

3. https ://nodejs.org/en/
4. https ://www.babylonjs.com/

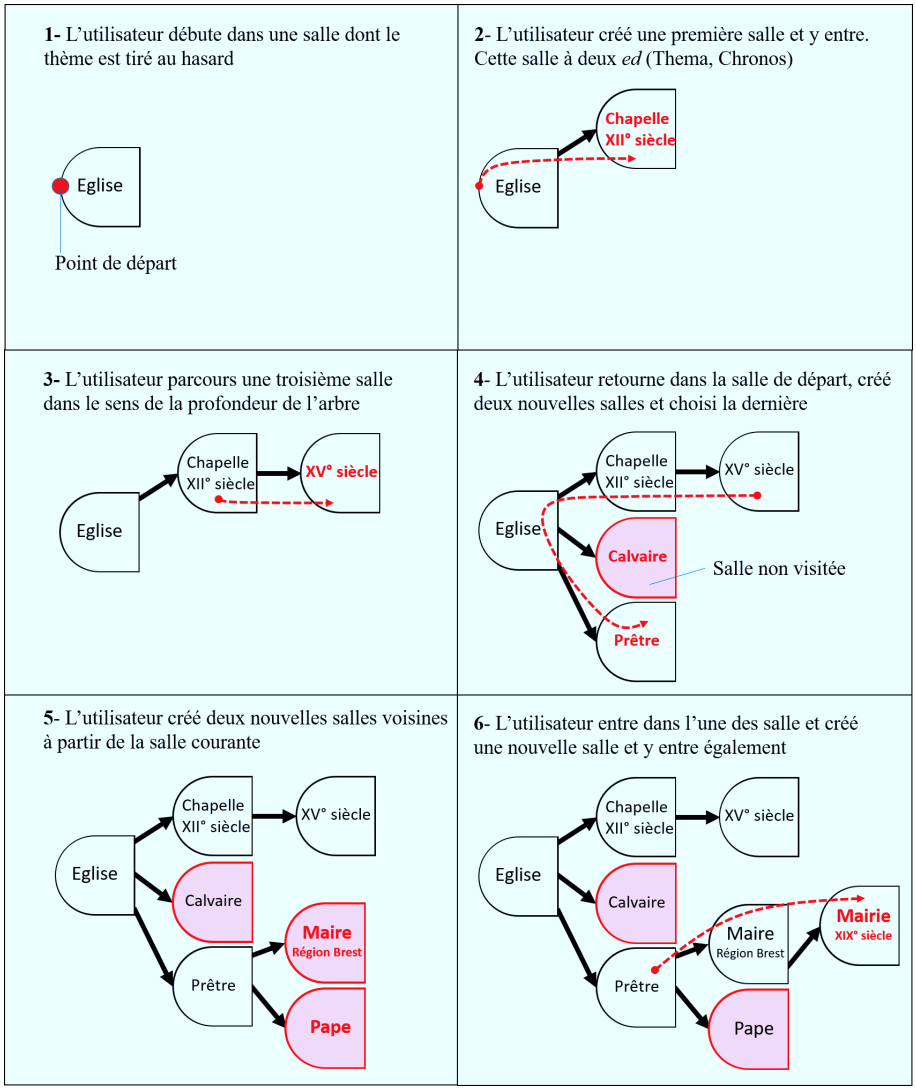


Figure 4.8 – Un exemple de parcours avec création dynamique de salles. Les salles en rose sont des salles non explorées par l'utilisateur.

découvrir les informations qu'elle contient. Lorsque l'utilisateur sélectionne une vignette disponible, le contenu de l'espace de présentation est remplacé par les objets correspondant aux thématiques de cette vignette. Dans ce cas, les concepts caractéristiques de la vignette orange seront remplacés par ceux de la vignette sélectionnée mais ils seront affichés sur la vignette représentant la salle précédente de la salle courante. Les outils de navigation sont accessibles à partir du menu qui se trouve en haut gauche de la page. Tous types d'interactions possibles en 3D ont d'équivalence en 2D (consulter une information, entrer/sortir d'une salle, ou mettre/enlever un élément dans un panier). Cependant, ils ne sont réalisables que via la souris.

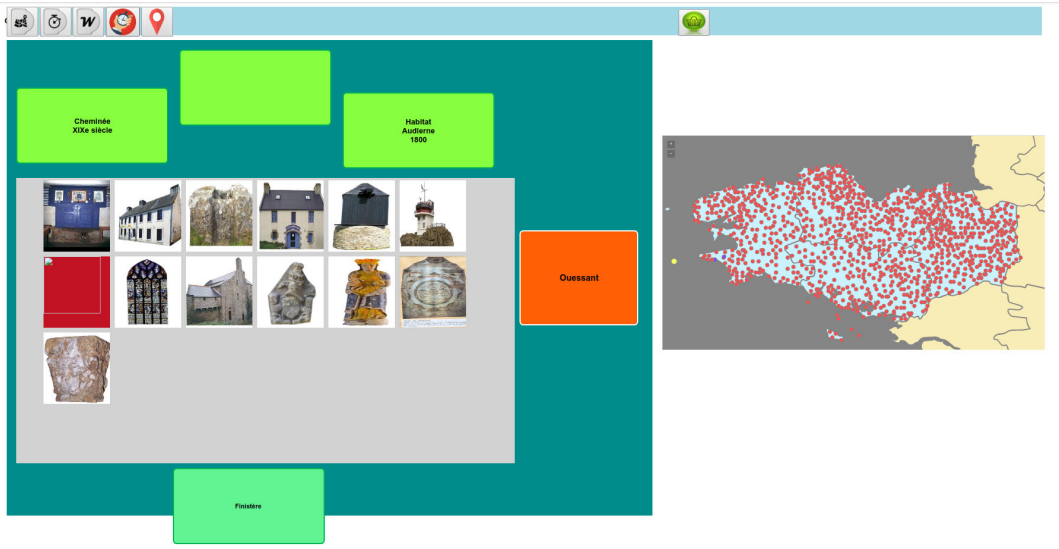


Figure 4.9 – Version 2D du « musée virtuel vivant »

4.2.2 Interface immersive

L'exploration en immersion se fait au moyen d'un casque de la réalité virtuelle et de manettes. Elle est illustrée par la figure 4.10, les objets patrimoniaux sont représentés par

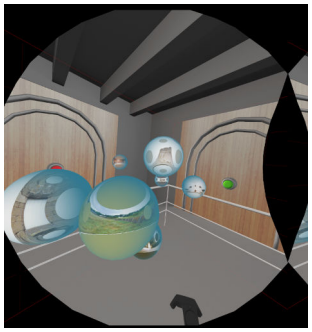


Figure 4.10 – Objets patrimoniaux dans la version immersive

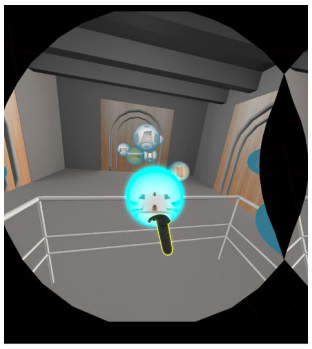


Figure 4.11 – Sélection d'un objet patrimonial dans la version immersive

Figure 4.12 – Consultation des informations sur un objet dans la version immersive

des boules qui flottent dans l'espace. Ces boules sont regroupées selon leurs relations sémantiques. Les textures des boules sont formées par les images des objets patrimoniaux qu'elles représentent. Les trois salles suivantes de la « salle courante » sont positionnées au niveau supérieur de cette dernière (voir Figure 4.16). Elle sont accessibles via des escaliers et des portes. L'utilisateur peut changer de salle en pointant avec une manette la porte de la salle qu'il veut visiter. Il peut également consulter les informations sur un objet en le sélectionnant via la manette. L'image de l'objet sélectionné s'affiche en grande taille (voir Figure 4.12) et les informations sur l'objet sont fournies par audio et par texte. Les interactions avec l'interface immersive est beaucoup plus naturelles que celles

proposées par les deux interfaces (2D et 3D) car l'utilisateur est immergé à l'échelle 1 dans les données et interagit avec elles directement, sans passer par des fonctions de transfert comme cela est le cas avec la souris. D'autre part cet environnement est plus affordant que les deux autres. D'après nous, cette immersion associée à l'autonomie de l'environnement, devrait accroître la présence et sans doute les performances de l'utilisateur en terme d'exploration. Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps d'évaluer cette hypothèse.

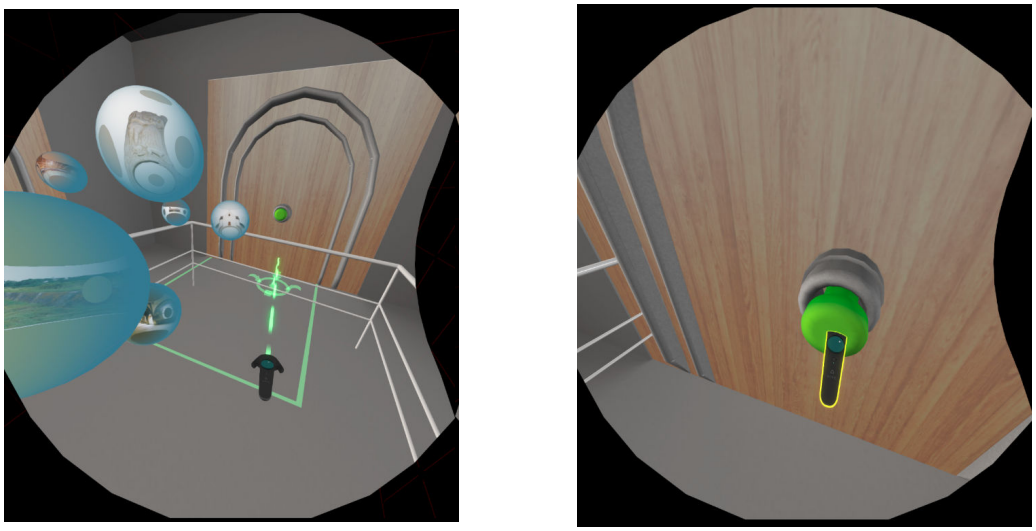


Figure 4.13 – Pointage et ouverture d'une porte dans la version immersive

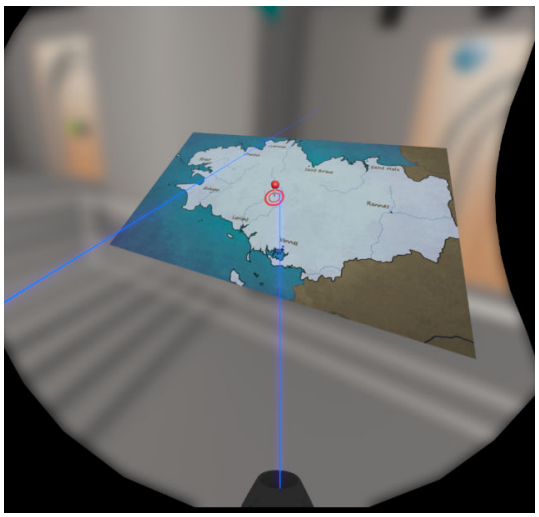


Figure 4.14 – Outil Carte dans la version immersive

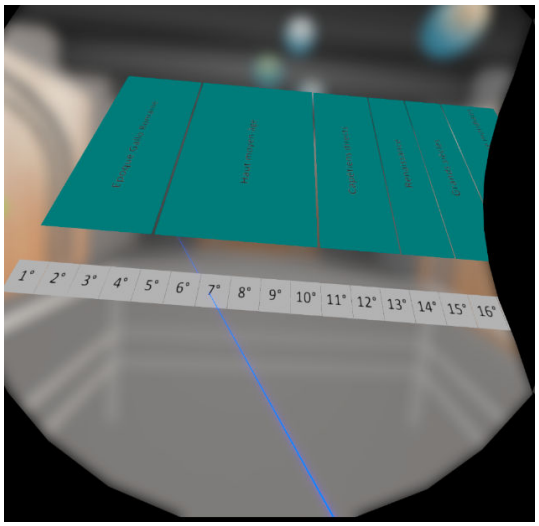


Figure 4.15 – Outil Frise chronologique dans la version immersive

Figure 4.16 – Nouvelle salle à explorer dans la version immersive

4.3 Application à un autre domaine

Pour montrer la généricité de notre approche, nous l'avons appliquée à un autre domaine. Les conditions minimales d'application sont :

- la possession d'une base de données décrivant les caractéristiques des données.
- l'existence d'une ontologie permettant de lier les données entre elles.
- l'existence d'une fonction d'incarnation des informations contenues dans la base de données.

Nous avons testé notre approche dans le domaine de la recherche bibliographique en utilisant la base de données de ACM contenant des informations sur des livres publiés entre 1992 et 2009 [5] (environ 100 000 livres). La figure 4.17 présente un extrait de l'ontologie que nous avons utilisé. Elle se structure selon les différents catégories de livres, une liste de dates et de personnes. Cette ontologie permet de lier les livres publiés par une même personne, ou les relations entre les personnes en fonction des livres qu'ils ont publié ou les dates pendant lesquelles ils les ont publié. La mise en place de ce système de recherche bibliographique en utilisant le musée virtuel fonctionne bien comme nous l'attendions (voir Figure 4.18). L'incarnation est ici la représentation du titre des articles. Cela nous permet également de vérifier la robustesse de notre système face à un ac-

5. `http://acm.rkbexplorer.com/`

croissement important du nombre de données (base de données 4 fois plus importante).

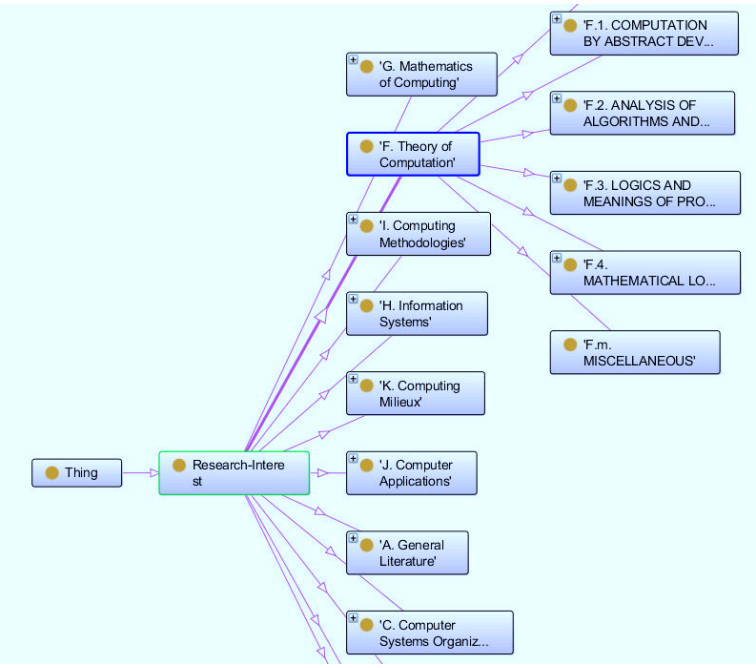


Figure 4.17 – Extrait d'ontologies sur les livres publiés par ACM

Figure 4.18 – « Musée virtuel vivant » sur les publications scientifiques : données de ACM

4.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes implémentations mises en œuvre au cours de cette thèse. Dans le cadre du projet ANTIMOINE, nous avons trois types de

données fournies par les partenaires du projet tels que : une base de données, un modèle syntaxique et des modèles sémantiques de données. La base de données concerne les informations sur les objets patrimoniaux en Bretagne. Pour explorer ces données, nous avons adopté une métaphore de « musée virtuel vivant ». Le musée présente une architecture client-serveur et est implémenté en utilisant les bibliothèques *Nodejs* et *Babylonjs*. Différents types d'interactions sont définis dans cette métaphore. Deux versions de musées ont été développées : une version préliminaire qui se base sur le modèle syntaxique et une version finale qui se base sur les modèles sémantiques. L'approche proposée a été appliquée à d'autres interfaces et à un domaine autre que le patrimoine. Lors de l'application de l'approche sur d'autres domaines, le code reste inchangé, seules les requêtes SPARQL permettant de construire les graphes de concepts à partir des ontologies sont différentes puisqu'elles dépendent du domaine.

Nous allons voir dans le chapitre 5 les différentes expérimentations réalisées pour évaluer notre approche.

5 EXPERIMENTATION

Rappelons que l'hypothèse fondamentale de notre travail est que le paradigme de l'énaction permet de concevoir des outils d'exploration de base de données afin de mieux comprendre un domaine particulier. Ce travail se base sur deux principes : **l'incarnation 3D** et **la co-évolution**. La méthode de travail adoptée consiste à :

- Abstraire la question en un problème générique,
- Énoncer les principes qui contribuent à la résolution de ce problème,
- Mettre en œuvre un programme selon ces principes,
- Mener des expérimentations pour valider ou infirmer les hypothèses.

Ce chapitre décrit les hypothèses à valider, les protocoles d'expérimentation et enfin une analyse des différents résultats obtenus.

Sommaire

5.1 Première expérimentation : Exp_A 97
5.1.1 Hypothèses d'évaluation . . . 97
5.1.2 Participants . . . 99
5.1.3 Description de l'expérimentation . . . 99
5.1.4 Résultats de l'expérimentation . . . 100
5.1.5 Discussion . . . 102
5.2 Deuxième expérimentation : Exp_B 105
5.2.1 Hypothèses d'évaluation . . . 106
5.2.2 Participants . . . 107
5.2.3 Description de l'expérimentation . . . 108
5.2.4 Résultats de l'expérimentation . . . 109
5.2.5 Discussion . . . 120
5.3 Conclusion 125

Nous nous intéressons essentiellement à montrer l'intérêt de la co-évolution. Deux expérimentations ont été réalisées :

— une première, notée Exp_A, a été réalisée à mi-parcours de la thèse. Elle avait pour objectif d'évaluer une version préliminaire de l'approche co-évolutive humain-système proposée. Elle nous a permis d'identifier les faiblesses de cette version et de dégager des éléments d'amélioration tels que l'échantillonnage de données et l'intégration d'un algorithme basé sur le principe de stigmergie présenté au chapitre 3 ainsi que de faire évoluer les outils de navigation tels qu'ils sont présentés au chapitre 4.

— La seconde expérimentation, notée Exp_B, plus conséquente, a été réalisée en fin de thèse et a permis d'évaluer la version finale de cette approche.

5.1 Première expérimentation : Exp_A

L'Exp_A a eu lieu en septembre 2016. Cette première proposition prend en considération l'analyse des interactions de l'utilisateur mais ne prend en compte ni l'analyse des enchaînements des interactions ni le style de navigation de l'utilisateur. Elle implémente une technique d'échantillonnage aléatoire pour sélectionner les nouvelles informations à ajouter dans l'environnement. Nous l'avons évaluée sur deux aspects : l'adaptabilité du système à l'utilisateur (1) et l'utilité des outils lors de l'exploration (2).

5.1.1 Hypothèses d'évaluation

Les hypothèses que nous voulions valider étaient les suivantes :

— **H1 [A]** : le système évolue en s'adaptant aux centres d'intérêt de l'utilisateur qui peuvent changer pendant l'exploration de la base de données.
Cette hypothèse se subdivise en deux sous-hypothèses :
  — **h1.1 [A]** : l'utilisateur perçoit et comprend la co-évolution.
  — **h1.2 [A]** : le principe de co-évolution guide l'utilisateur pendant son exploration en exploitant les structures sémantiques.

— **H2 [A]** : les outils permettent non seulement de comprendre ce que perçoit le système mais également de guider l'exploration.
Cette hypothèse se subdivise en deux sous-hypothèses :
  — **h2.1 [A]** : la représentation de la pertinence des données grâce aux outils permet à l'utilisateur de mieux comprendre son interaction avec le système.
  — **h2.2 [A]** : la possibilité d'utilisation des outils permet à l'utilisateur de mieux maîtriser son exploration de données.

Pour valider ces hypothèses, nous avons établi une liste de questions que chaque participant devait évaluer (voir Tableau 5.1).

Tableau 5.1 – Questionnaire pour valider les hypothèses liées à Exp_A

Hypothèses		Questions subjectives
H1 [A]	h1.1 [A]	J'ai eu l'impression que le système m'aidait dans la sélection des objets en me présentant des objets pertinents.
		Les objets présentés par le système m'ont semblé avoir été sélectionnés au hasard.
		Je pense que le système a bien compris les thèmes que je souhaitais sélectionner et m'a aidé à le faire.
		J'ai trouvé que le système ne comprenait pas ce que je souhaitais explorer.
		Je pense que le système m'a permis de découvrir des éléments liés à mon(mes) centre(s) d'intérêt mais auxquels je ne m'attendais pas.
		Je n'ai pas l'impression que le système m'a permis d'élargir mes centres d'intérêt en me proposant des objets différents de mes centres d'intérêt
		J'ai trouvé facile d'explorer le(s) thème(s) que j'avais décidé d'explorer et d'y sélectionner des objets.
		J'ai constaté que les suggestions du système étaient de plus en plus pertinentes au cours de mon parcours.
	h1.2 [A]	Je pense que j'ai réussi à faire évoluer le système vers un thème que j'avais ciblé.
		Je pense qu'il n'y avait pas moyen de guider le système vers un thème en particulier.
		J'ai eu l'impression que le choix des thèmes associés aux nouvelles salles est facile à maîtriser.
		Je n'ai pas eu l'impression que les salles s'ouvraient sur des thèmes que je cherchais à explorer.
		J'ai eu l'impression qu'il est facile de faire évoluer le système d'un thème à un autre.
		Une fois que le système était fixé sur un thème, j'ai trouvé difficile de le faire passer à un autre thème.
H2 [A]	h2.1 [A]	Les outils (cartes, mots et horloge) m'ont été utiles pour mieux identifier le thème que je voulais explorer.
		Je n'ai pas eu besoin des outils (cartes, mots et horloge) pour explorer la base.
		Les outils (cartes, mots et horloge) m'ont permis de voir que le système cherchait à identifier mes centres d'intérêt.
		Je n'ai pas eu l'impression que les outils (cartes, mots et horloge) permettaient au système d'analyser mes intentions.

	h2.2 [A]	Les outils (cartes, mots et horloge) m'ont aidé à trouver les objets que je cherchais.
		Les outils (cartes, mots et horloge) ne m'ont pas été utiles pour trouver les objets que je cherchais.
		Je pense que l'utilisation des outils (cartes, mots et horloge) aide le système à suggérer des objets pertinents.
		Je ne pense pas que le système a tenu compte des outils (cartes, mots et horloge) pour me suggérer de nouveaux objets.

5.1.2 Participants

Pour réaliser cette expérimentation, nous avons recruté une trentaine de personnes, âgées de 17 à 40 ans, dont la majorité étaient des étudiants de l'ENIB (École Nationale d'Ingénieur à Brest). Les participants étaient plutôt familiers avec l'informatique et n'avaient qu'une connaissance limitée du patrimoine de Bretagne.

5.1.3 Description de l'expérimentation

Quatre variantes de l'application ont été proposées pour cette expérimentation préliminaire :

— une variante avec l'algorithme d'adaptation et avec les outils (V_1)
— une variante avec l'algorithme d'adaptation et sans outils (V_2)
— une variante sans l'algorithme d'adaptation et avec les outils (V_3)
— une variante sans l'algorithme d'adaptation et sans outils (V_4)

Pour les variantes sans algorithme d'adaptation, les recommandations des salles sont faites de façon aléatoire sans prendre en compte les interactions de l'utilisateur. La technique d'échantillonnage de données est systématiquement aléatoire. Par conséquent, lorsque le système recommande une nouvelle salle (à partir de l'algorithme d'adaptation ou de la recommandation aléatoire), une quantité limitée de données correspondant aux thématiques de la nouvelle salle est sélectionnée aléatoirement.

Lors de cette expérimentation, nous avons demandé aux participants d'accomplir une tâche telle que naviguer dans le musée virtuel et de récupérer une dizaine d'objets patrimoniaux qui leurs semblent pertinents pour réaliser une plaquette touristique de la Bretagne.

Concernant le déroulement de l'expérimentation, nous avons fait passer les participants quatre par quatre : un pour chaque variante. Chaque participant a commencé par une phase d'apprentissage. Pour cela, il a suivi un tutoriel expliquant toutes les interactions possibles dans l'environnement et permettant de les tester. Après cette phase d'apprentissage qui durait 5 minutes, le participant pouvait passer à l'expérimentation qui

durait 20 minutes.

A la fin de l'expérimentation, chaque participant a répondu au questionnaire présenté par le Tableau 5.1. Pour chacune des questions, nous avons utilisé une *Echelle de Likert* (Allen et Seaman 2007) permettant aux participants d'exprimer leur degré d'accord (valeur entre 4 et 7) ou de désaccord (valeur entre 0 et 3) relatif à chaque affirmation. Certaines des questions étaient posées sous la forme négative dans le but d'avoir des questions redondantes et de pouvoir vérifier la robustesse des avis énoncés. Lors des études statistiques, les valeurs des réponses aux questions posées sous la forme négative sont remplacées par leur complémentaire à 7.

5.1.4 Résultats de l'expérimentation

La figure 5.1 présente les moyennes des valeurs de réponses des participants relatives à l'hypothèse **h1.1 [A]**. Nous pouvons voir sur la figure 5.1 que les valeurs moyennes

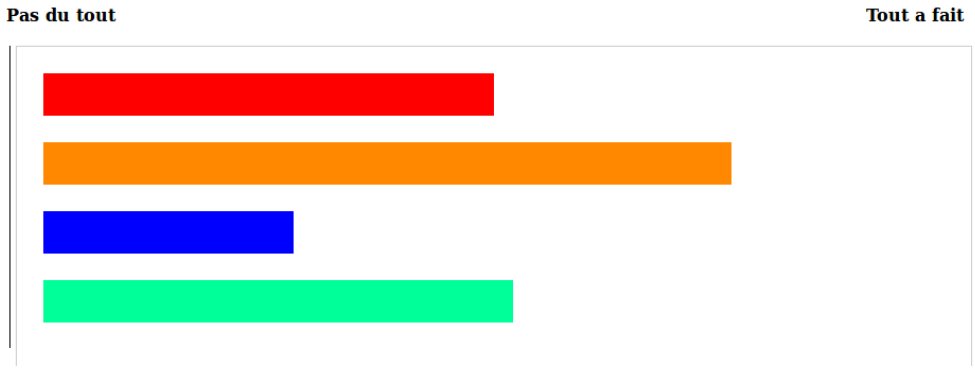


Figure 5.1 – Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h1.1 [A]
: Adaptation avec outils (V_1) : Aléatoire avec outils (V_3)
: Adaptation sans outils (V_2) : Aléatoire sans outils (V_4)

des réponses des participants qui ont utilisé les variantes V_1, V_3 et V_4 sont inférieures à la moyenne de l'*échelle de Likert*. Pourtant, la majorité des participants qui ont utilisé la variante V_2 de l'application ont perçu et ont compris la co-évolution. La valeur moyenne des réponses qu'ils ont données est supérieure à la moyenne qui représente environ les 3/4 de la valeur maximale de l'*échelle de Likert*. Néanmoins, ces résultats ne sont pas statistiquement significatifs.

Les valeurs moyennes des réponses correspondant à l'hypothèse **h1.2 [A]** sont présentées par la figure 5.2. Nous pouvons voir grâce à cette figure que les participants qui ont utilisé les variantes V_1 et V_2 ont eu le sentiment qu'ils pouvaient guider leur exploration, ce qui n'est pas le cas des participants qui ont utilisé les variantes V_3 et V_4. L'adaptation semble donc être perçue.

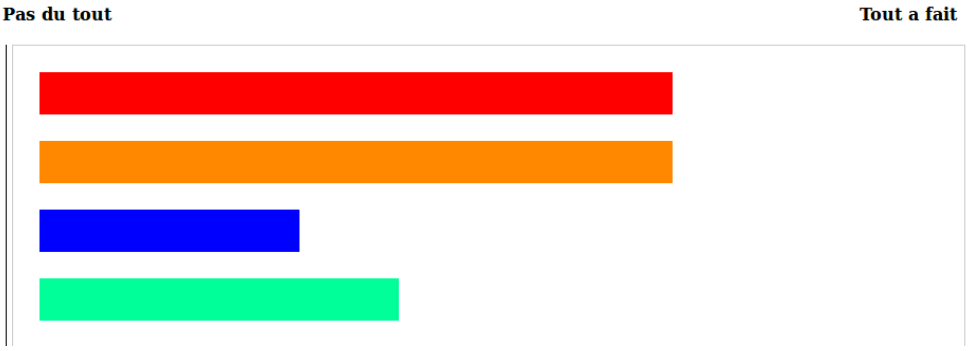


Figure 5.2 – Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h1.2 [A]
: Adaptation avec outils (V_1) : Aléatoire avec outils (V_3)
: Adaptation sans outils (V_2) : Aléatoire sans outils (V_4)

La figure 5.3 illustre le fait que les participants utilisant la variante V_1 ont davantage le sentiment que les outils les ont aidés à comprendre leurs intentions relativement aux participants utilisant la variante V_3.

La figure 5.4 nous montre que tous les participants utilisant les variantes V_1 et V_3 n'avaient pas eu l'impression que l'utilisation des outils leur permettant de mieux maîtriser leur exploration.

Figure 5.3 – Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h2.1 [A]
: Adaptation avec outils (V_1) : Aléatoire avec outils (V_3)

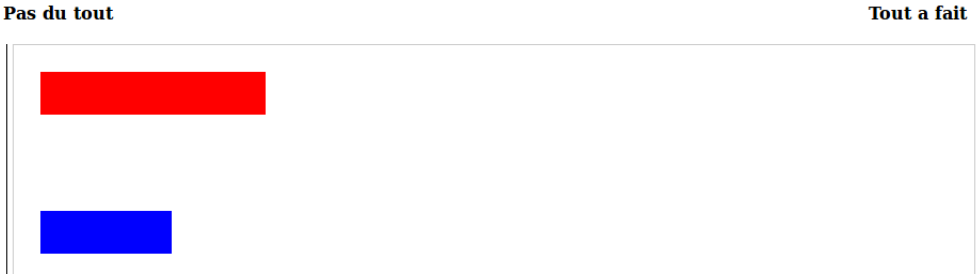


Figure 5.4 – Moyennes des réponses aux questions correspondant à l'hypothèse h2.2 [A]
: Adaptation avec outils (V_1) : Aléatoire avec outils (V_3)

Le tableau 5.2 illustre un extrait de quelques commentaires des participants que nous

considérons riches d'enseignements pour la première expérimentation. Ces commentaires confortent les tendances statistiques (voir section 5.1.5).

Tableau 5.2 – Extrait de commentaires pour l'expérimentation Exp_A

	Commentaires
C1	Je n'ai vu ni la mer ni la musique. Je me suis sans doute mal adapté au système d'exploration.
C2	A vrai dire, mon premier but était de sélectionner des objets dont je connaissais déjà l'existence, voire que j'avais déjà eu l'occasion de voir. Cependant ne parvenant pas vraiment à trouver ce que je cherchais j'ai préféré sélectionner des objets qui pour moi représentent la beauté de notre région.
C3	Je cherchais des objets que je connais, je suis breton et donc j'ai cherché à retrouver des objets proches de chez moi. Ou sinon je voulais des objets stylés ! Par exemple des châteaux, des canons, des tableaux.
C4	Il y avait trop d'églises.
C5	Les questions commençant par une négation peuvent prêter à confusion avec une échelle de notation de pas du tout à tout à fait, on ne sait pas forcément dans quel sens les interpréter.
C6	J'ai sélectionné des objets issus de différents endroits de la Bretagne, souvent sur le thème de l'architecture et des technologies. Ces thématiques représentent pour moi un repère chronologique. J'ai sélectionné des éléments de différents thèmes et de différentes dates pour essayer de représenter différentes époques et modes de vie : religion-vie rurale-urbaine.

5.1.5 Discussion

Cette expérimentation n'a pas donné les résultats que nous attendions. Même si les tendances relevées pour l'évaluation de l'hypothèse **H1 [A]** vont dans le bon sens, les résultats ne sont pas statistiquement significatifs. De même, l'intérêt de l'utilisation des outils en termes de compréhension et de maîtrise d'exploration n'a pas été mise en évidence pour les participants. Ceci s'explique par les faits suivants :

— Les participants sont peu nombreux. Nous avions recruté 32 personnes pour les quatre variantes du système, ce qui fait seulement 8 personnes pour chaque variante. Cela ne nous permet pas de valider statistiquement nos hypothèses.

— Les participants n'avaient pas une sensibilité particulière relative au domaine du patrimoine.

— En analysant les résultats d'expérimentation, nous avons constaté, à travers les commentaires, que la majorité des sujets ont déjà en tête, au début de l'expérimentation, des idées sur ce que représente la Bretagne (voir Tableau 5.2 : C1, C2

et C3). De ce fait, ils ont essayé de chercher ces éléments dans le musée. Ceci pose problème parce que notre système n'est pas conçu pour la recherche spécifique d'objets, ce qui fait que l'hypothèse **h.1.1 [A]** n'est pas vérifiée. Notre travail est dédié à l'exploration et la découverte. L'idée de départ est que l'utilisateur ne sait pas ce qu'il cherche, ses centres d'intérêt évoluent en fonction de ce qu'il a perçu dans son environnement. En résumé, nous nous sommes rendu compte que la tâche demandée aux participants ne permet pas d'évaluer l'hypothèse **h.1.1 [A]**. Il existe quand même une minorité de participants qui a compris globalement l'objet de l'expérimentation et a essayé d'explorer les données suivant une unique structure sémantique (voir Tableau 5.2 C6).

— La quatrième raison qui explique ce résultat se trouve au niveau de la distribution inéquitable des données dans les différentes catégories de patrimoine. Les utilisateurs ont constaté que le système leur suggère souvent des objets patrimoniaux liés à la religion (voir Tableau 5.2 : C4), ce qui n'est ni représentatif de Bretagne ni intéressants pour certains. Ceci explique leur insatisfaction.
Après quelques études statistiques sur notre base de données, nous avons constaté que plus de 50% des éléments appartiennent à la catégorie *Patrimoine religieux*. C'est la raison pour laquelle les objets réligieux sont sur-représentés. Pour pallier ce problème, nous avons décidé d'utiliser une technique d'échantillonnage de données autre que l'échantillonnage aléatoire.

— Le cinquième problème se situe au niveau de la méthode que nous avons choisie pour évaluer la validité de notre approche. Dans cette expérimentation, nous n'avons évalué que la satisfaction des utilisateurs. Or, l'objectif global du système est de créer un parcours de navigation qui peut donner du sens. Il faudrait alors aussi évaluer la trace de navigation, les proximités sémantiques des salles qui sont créées, les proximités des concepts visités, l'évolution du changement d'intérêt, l'adaptabilité du système ou celle de l'utilisateur.

— Nous avons constaté également, à partir des commentaires et des demandes sur place, que les participants avaient du mal à répondre aux questions posées à la forme négative (voir Tableau 5.2 C5).

— Concernant l'utilisation des outils, il semble qu'ils n'avaient pas été bien pensés. Prenons l'exemple de la carte, la Bretagne est découpée en petites zones. Cela était réalisé en partitionnant l'espace au moyen d'un diagramme de *Voronoï*. Ce découpage purement topologique rend difficile la localisation des espaces administratifs (département ou commune). Quant à la dimension thématique, les seuls mots clés présentés à l'utilisateur sont ceux associés aux objets qu'il a perçus. Cela ne lui permet pas d'étendre sa recherche à des mots clés voisins.

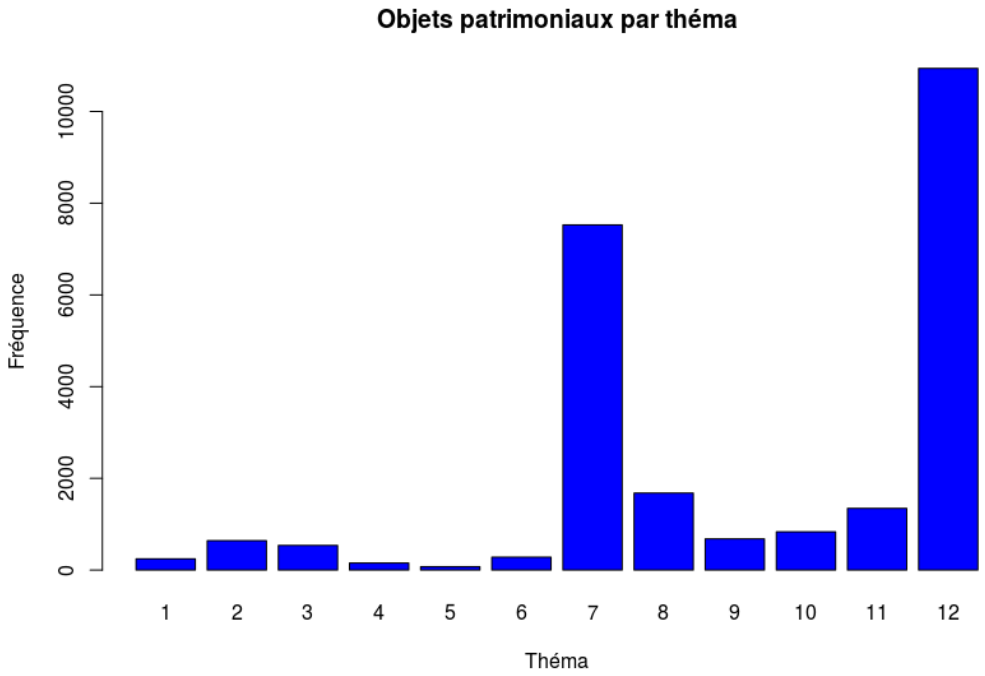


Figure 5.5 – Répartition des données par thématique

1 : Patrimoine naturel
2 : Patrimoine militaire
3 : Patrimoine administratif et politique
4 : Patrimoine de l'éducation
5 : Patrimoine de la santé
6 : Patrimoine commercial et des services
7 : Patrimoine de la vie quotidienne
8 : Patrimoine industriel et artisanal
9 : Patrimoine rural et agricole
10 : Patrimoine des arts et de la culture
11 : Patrimoine des traditions et de la commémoration
12 : Patrimoine religieux

Cette étape d'expérimentation Exp_A a donc été très instructive. En effet, elle nous a permis d'approfondir nos études et de détecter des problèmes que nous avions ignorés dans un premier temps. Par conséquent, après cette expérimentation, nous avons introduit les éléments suivants :

— une technique d'échantillonnage à deux degrés : échantillonnage en « grappes stratifiées » (voir annexe B).

— un algorithme de diffusion de phéromones (section 3.4.2) qui permet d'analyser les enchaînements des interactions de l'utilisateur lors de son parcours afin de mieux cerner ses centres d'intérêt (voir section 3.4.2 du chapitre 3).

— de nouvelles versions des outils qui permettent de présenter les structures sémantiques des concepts aux niveaux spatial, temporel et thématique. Les outils peuvent alors être considérés comme des incarnations graphiques des structures sémantiques.

Pour l'expérimentation finale, notre travail consiste à :

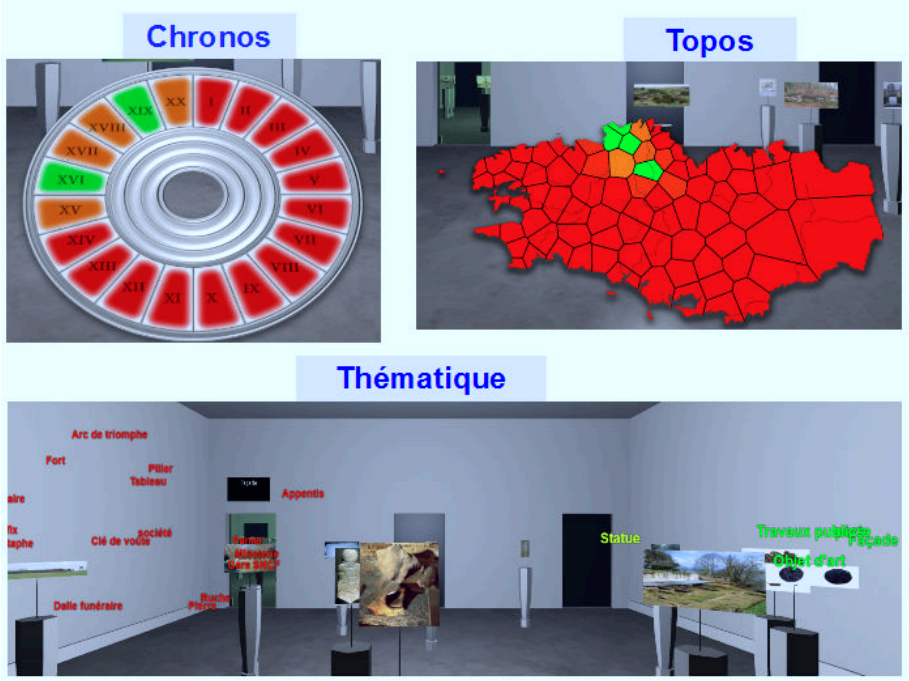


Figure 5.6 – Outils implémentés dans la version évaluée lors de l'Exp_A

— redéfinir des scénarios et/ou des tâches,
— choisir un terrain d'expérimentation plus proche du domaine du patrimoine,
— revoir les hypothèses pour qu'elles soient plus précises et moins ambitieuses,
— recruter plus de 30 participants pour chaque expérimentation afin que les résultats soient valides statistiquement.

5.2 Deuxième expérimentation : Exp_B

Les améliorations mentionnées précédemment ont été mises en œuvre en intégrant les éléments décrits au chapitre 3. En utilisant cette version, une deuxième expérimentation, notée Exp_B, a été réalisée en septembre 2017 au *Château de Trevarez* (commune de Saint-Goazec dans le département du Finistère) lors des journées européennes du patrimoine.

Nous avons évalué notre approche en nous limitant cette fois à deux aspects :

1. l'adaptabilité de notre système à l'utilisateur
   Cet aspect inclut des mesures objectives sur le comportement du système ainsi qu'une évaluation subjective qui permet de confirmer ou d'infirmer les hypothèses.

2. l'expérience de l'utilisateur
   Cet aspect inclut la compréhension de l'utilisateur, son appréciation du comportement du système, sa sensation sur la capacité du système à permettre la découverte d'informations intéressantes et à attirer son attention, ainsi que son impression sur la représentation graphique.

5.2.1 Hypothèses d'évaluation

Les hypothèses que nous cherchions à évaluer pour cette expérimentation Exp_B sont les suivantes :

- **H1 [B]** : Le système s'adapte, en temps réel, aux centres d'intérêt de l'utilisateur tout en étant capable d'influencer l'utilisateur dans la découverte de nouvelles informations.
  - **h1.1 [B]** : Le système distingue les informations proches et éloignées des centres d'intérêt de l'utilisateur.
  - **h1.2 [B]** : l'utilisateur perçoit que le système propose des informations proches de ses centres d'intérêt.
  - **h1.3 [B]** : Le système est capable de suivre les centres d'intérêt de l'utilisateur même si ceux-ci changent pendant l'exploration.
  - **h1.4 [B]** : Le système est capable d'influencer l'utilisateur et l'invite à modifier ses centres d'intérêt en lui proposant des nouveautés.
- **H2 [B]** : La navigation en 3D améliore l'expérience de l'utilisateur en termes de découverte et de perception des informations.
  - **h2.1 [B]** : La navigation en 3D permet de découvrir plus d'informations que la navigation en 2D.
  - **h2.2 [B]** : L'interface 3D donne une meilleure perception que l'interface 2D.
  - **h2.3 [B]** : L'exploration en 2D est plus rapide que l'exploration en 3D.

Pour valider ces hypothèses, nous avons mis en place deux expérimentations : la première (*Exp1 [B]*) pour valider l'hypothèse **H1 [B]** et la seconde (*Exp2 [B]*) pour valider l'hypothèse **H2 [B]**. A cette fin, des mesures subjectives et objectives ont été établies. Le tableau 5.3 illustre les différentes mesures définies pour valider chacune des hypothèses.

Tableau 5.3 – Mesures pour valider les hypothèses de l'expérimentation Exp_B

Hypothèses		Exp	Évaluations objectives (mesure, visualisation, analyse) et subjectives (questionnaire)
H1 [B]	h1.1 [B]	Exp1 [B]	**q1.** Pendant votre exploration, vous vous êtes intéressés aux concepts suivants à certains moments ? $c_1, ..., c_{10}$ (Oui/ Plutôt Oui/ Plutôt Non/ Non).
	h1.2 [B]	Exp1 [B]	**q2.** Quand de nouvelles salles sont proposées, leurs thèmes dépendent-ils des objets que vous avez consultés dans des salles précédentes ? (Oui/Non) **q3.** Les thèmes des nouvelles salles dépendent de votre usage des outils (carte, frise chrono, mots clés) ? (Oui/Non).
	h1.3 [B]	Exp1 [B]	Analyse de la trace d'interaction

	h1.4 [B]	Exp1 [B]	**q4.** - Avez-vous l'impression que l'application vous a aidé à découvrir des objets qui ne vous intéressaient pas auparavant ? (oui/non) - Analyse de la trace d'interaction
H2 [B]	h2.1 [B]	Exp2 [B]	**q5.** L'ouverture des portes dans la version 3D suscite plus de découverte d'informations que les clignotements des boutons dans la version 2D. (Pas du tout d'accord, pas d'accord, pas d'opinion, d'accord, tout à fait d'accord) - Analyse de la trace d'interaction
	h2.2 [B]	Exp2 [B]	**q6.** L'application fait en sorte que plus les objets ont des points communs entre eux, plus ils se regroupent à l'écran, qui fait le mieux ? (3D/2D) **q7.** La 3D donne plus de repère que la 2D (Pas du tout d'accord, pas d'accord, d'accord, tout à fait d'accord) **q8.** Je préfère explorer les données en (3D/2D)
	h2.3 [B]	Exp2 [B]	**q9.** Explorer les données en 2D est plus efficace qu'en 3D (Pas du tout d'accord, pas d'accord, pas d'opinion, d'accord, tout à fait d'accord)

5.2.2 Participants

Pendant les journées du patrimoine, nous avons invité les visiteurs du château à passer les expérimentations : *Exp1 [B]* et *Exp2 [B]*. Une même personne ne pouvait participer qu'à l'une des deux expérimentations.

45 personnes ont passé l'expérimentation *Exp1 [B]* :

— il y avait 24 femmes et 21 hommes,

— L'âge médian de ces participants est de 42 ans, le plus jeune a 12 ans et le plus âgé a 74 ans,

— Nous leur avons demandé des informations sur leur familiarité avec les jeux vidéos (de 1 : pas du tout à 5 : beaucoup), ainsi que sur leur intérêt pour le patrimoine (de 1 : pas du tout à 5 : beaucoup). 71,11% des participants ont donné une valeur inférieure ou égale à 2 sur leur familiarité aux jeux vidéo et 86,6% d'entre eux ont donné une valeur supérieure ou égale à 3 pour leur intérêt sur le patrimoine.

31 personnes ont passé l'expérimentation *Exp2 [B]* :

— il y avait 16 femmes et 15 hommes.

— l'âge médian des participants est de 41 ans, ils avaient entre 17 et 75 ans.

— 70,96% des participants n'étaient pas familiarisés avec les jeux vidéos (ils ont donné

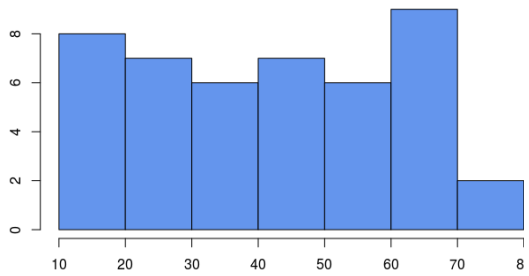


Figure 5.7 – Distribution des participants en *Exp1 [B]* selon leur âge

.

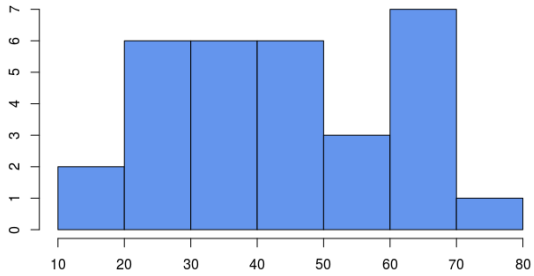


Figure 5.8 – Distribution des participants en *Exp2 [B]* selon leur âge

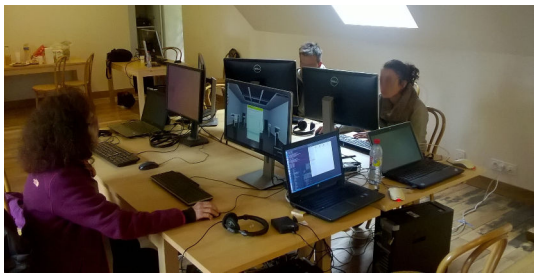
.

des valeurs inférieures ou égales à 2), tandis que 93,55% d'entre eux sont intéressés par le patrimoine (ils ont donné des valeurs supérieures ou égale à 3).

Nous considérons que notre échantillon de participants est représentatif et riche en informations au regard de sa composition en terme de genre, de tranches d'âge (voir Figure 5.7 et la figure 5.8) et de personnes familiarisées ou non avec les jeux vidéos.

5.2.3 Description de l'expérimentation

Pour mettre en place les deux expérimentations (*Exp1 [B]* et *Exp2 [B]*), nous avons configuré la salle comme illustré par la figure 5.9. Huit ordinateurs ont été utilisés : un serveur, cinq clients et deux autres postes pour présenter le tutoriel.



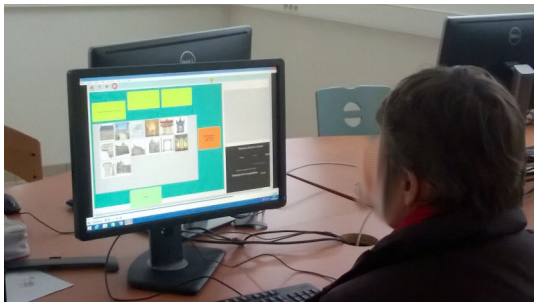


Figure 5.9 – Photos de la salle d'expérimentation et de quelques participants

La répartition des participants pour les deux expérimentations est la suivante : les visiteurs du premier jour ont passé *Exp1 [B]*, tandis que les visiteurs du deuxième jour ont passé *Exp2 [B]*.

Rappelons que *Exp1 [B]* consiste à évaluer l'hypothèse de l'adaptabilité du système à l'utilisateur, tandis que *Exp2 [B]* consiste à comparer l'expérience de l'utilisateur entre

une exploration en 3D et une exploration en 2D. Pour les deux expérimentations, la tâche était de naviguer dans un musée virtuel comme dans un musée réel, de consulter des objets et de mettre dans un panier virtuel les œuvres correspondant à leurs centres d'intérêt.

Avant l'expérimentation, chaque participant a dû visualiser un tutoriel et remplir un formulaire de renseignement (âge, genre, département, familiarité avec les jeux vidéos et intérêt pour le patrimoine). Après avoir saisi ces informations, les participants qui passaient *Exp1 [B]* ont exploré les données avec l'interface 3D pendant 10 minutes avant de répondre aux questions décrites dans le tableau 5.3. Les participants qui passaient *Expe2 [B]* exploraient les données via l'interface 3D ou l'interface 2D pendant 5 minutes de façon alternative avec un choix de la première interface distribué afin d'éviter un effet d'ordre. A la fin, il répondaient aux questions décrites dans le tableau 5.3. Après avoir répondu aux questions, les participants pouvaient ajouter des commentaires libres.

Pour les deux expérimentations, nous avons sauvegardé toutes les interactions des participants (le temps, les œuvres consultées, les œuvres gardées, les salles visitées, ou la sélection via des outils), ainsi que les salles créées pendant leur exploration afin d'étudier les comportements du système et de l'utilisateur. Des exemples de listes des interactions et des recommandations sont présentés dans Annexe D.

5.2.4 Résultats de l'expérimentation

▶ Résultats de *Exp1 [B]*

La question **q1** consistait à demander à l'utilisateur s'il s'était intéressé à certains concepts à certains moments. Pour cela, 10 concepts lui étaient proposés :

- 4 concepts que le système a considéré plus pertinents,
- 3 concepts que le système a considéré moins pertinents,
- 3 autres concepts de pertinence moyenne toujours selon le système (pertinence entre $0,1$ et $0,4$).

Rappelons que les pertinences des concepts sont comprises entre 0 et 1. Les seuils de $0,1$ et $0,4$ ont été choisis, de façon empirique, à partir des observations de plusieurs sessions. Les 10 concepts sont ordonnés de façon aléatoire (et changent d'un utilisateur à un autre). Le tableau 5.4 illustre le tableau de contingence entre les évaluations de pertinence des concepts par le système et par l'utilisateur.

Pour vérifier s'il existe une relation entre les valeurs données par le système et celles données par les utilisateurs, nous avons utilisé le **test de** χ^2. Nous avons obtenu une probabilité p égale à $1,505 * 10^{-12}$, qui est significativement petite par rapport à $0,05$. Ce qui nous permet de rejeter l'hypothèse nulle (il n'y a pas de relation) et de confirmer qu'il y a une relation significative entre les valeurs données par le système et les réponses des utilisateurs à propos de leur intérêt sur les concepts proposés.

Tableau 5.4 – Tableau de contingence entre les évaluations du système et celles des utilisateurs

Utilisateur/Système	Pertinent	$[0,1;0,4]$	Non Pertinent	Total
Oui	79	54	12	145
Plutôt Oui	46	32	29	107
Plutôt Non	30	33	38	101
Non	24	20	53	97
Total	179	139	132	450

Les questions **q2** et **q3** consistaient à demander aux utilisateurs s'ils ont eu l'impression que les salles créées ont des liens avec leurs interactions avec les objets (**q2**) ou avec les outils (**q3**).

La figure 5.10 et la figure 5.11 montrent que $62,22\%$ des participants ont répondu «

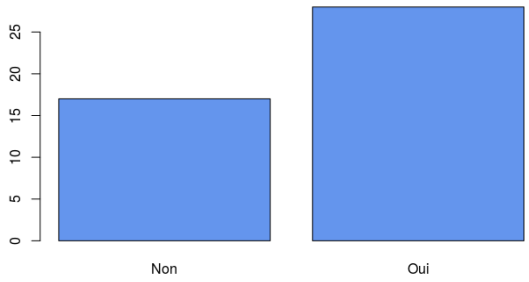


Figure 5.10 – Réponses à la question **q2**

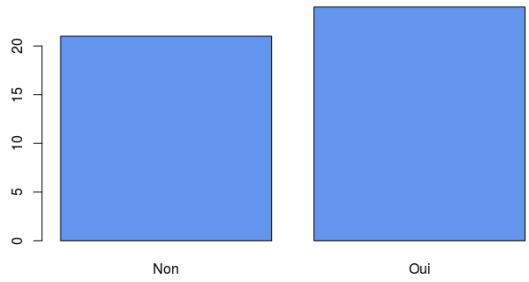


Figure 5.11 – Réponses à la question **q3**

Oui » à la question **q2** et 53,33% des participants ont répondu « Oui » à la question **q3**. En utilisant le **test de proportionnalité** qui est un test binomial, nous avons obtenu une probabilité $p = 0,06758$ pour **q2** et $p = 1$ pour **q3**. Les différences de proportion de distribution de réponses pour les deux questions ne sont pas significatives. Pourtant, l'intervalle de confiance pour la question **q2** nous donne une information intéressante par le fait que le taux de réponse de « Oui » est entre $48,87\%$ et 100% si on change d'échantillon.

La question **q4** a été posée pour savoir si le participant confirme que le musée l'a aidé à découvrir des objets qu'il ne l'auraient pas intéressés auparavant. La figure 5.12 illustre les réponses des participants à cette question. 80% des participants ont répondu « Oui » à la question. En utilisant le **test de proportionnalité**, nous avons obtenu une valeur de probabilité p qui est égale à $3,287 * 10^{-5}$, qui est significativement inférieure à $0,05$. En effet, l'hypothèse nulle (les deux catégories de réponses ont la même proportion) a été rejetée et nous pouvons confirmer que la proportion de la réponse « Oui » pour cette population est supérieure à 50%, le pourcentage réel étant entre $67,69\%$ et 100%.

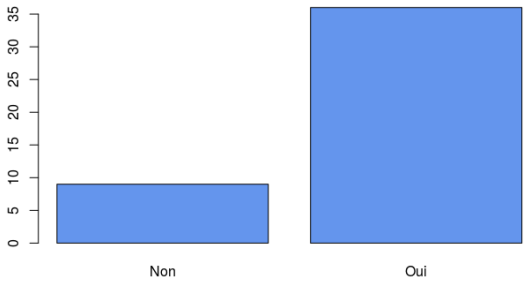


Figure 5.12 – Réponses à la question **q4**

Analyse des traces d'interaction des participants

Lors de ces expérimentations, nous avons enregistré tous les concepts consultés par les participants lors de leur parcours à travers le musée (la sélection des objets, les passages dans des salles ou l'utilisation des outils) et les concepts recommandés par le système à travers des créations des salles. Puisque chaque élément dans le musée virtuel est lié au moins par un concept, il est alors possible de mesurer la distance sémantique entre deux concepts consultés successivement ou entre deux concepts recommandés successivement. Les figures 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 et 5.17 représentent des scénarios d'exploration.

Chaque figure est décrite en utilisant les conventions suivantes :

— **Style des points** : les concepts consultés par les utilisateurs sont représentés par des cercles tandis que les concepts recommandés sont représentés par des étoiles.

— **Axes** : l'abscisse représente le temps d'exploration et l'ordonnée représente la distance sémantique entre deux interactions successives ou deux recommandations successives. Le calcul de la distance sémantique se base sur la formule de similarité sémantique définie dans la section 4.1.1. Il est défini par une fonction complémentaire de la similarité sémantique ($distance = 1 - \Gamma$). En effet, dans les différentes figures, plus la valeur de y tend vers 0, plus le concept qui vient d'être consulté/recommandé est proche sémantiquement du concept précédemment consulté/recommandé. Plus cette valeur est proche de 1, plus le concept qui vient d'être consulté/recommandé est loin sémantiquement au concept précédemment consulté/recommandé.

— **Couleur** : Puisque la mesure de distance sémantique ne peut être calculée que dans une même structure sémantique, les concepts sont catégorisés en fonction de ces structures, chacune associée à une couleur : rouge pour la structure thé-

matique, bleu pour la structure temporelle et rose pour la structure spatiale. Les concepts recommandés sont également catégorisés en fonction leurs structures sémantiques (Figure 5.13 et Figure 5.14).

Nous avons identifié **5 catégories de profils utilisateurs** :

La figure 5.13 illustre la trace d'interaction d'un utilisateur de type **curieux**. Il a souvent interagi avec l'environnement durant son exploration et il a souvent changé de concepts consultés. Nous supposons que ce type d'utilisateur n'a pas de centres d'intérêt précis. Il a exploré et a découvert des informations diverses. La recommandation du système varie elle aussi très souvent en fonction de changement de centre d'intérêt de l'utilisateur. Ce qui illustre la capacité du système à « suivre » l'instabilité des centres d'intérêt de l'utilisateur.

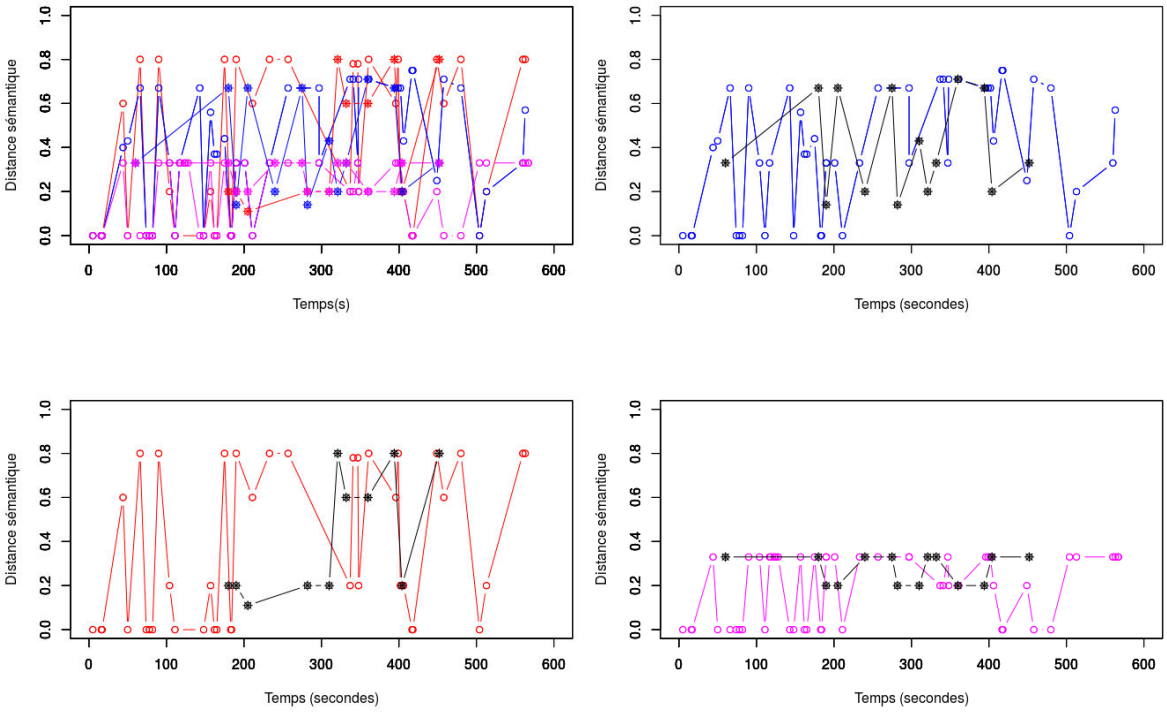


Figure 5.13 – Traces d'interaction d'un explorateur curieux
Haut Gauche : Trace dans toutes les dimensions Haut Droite : Trace dans la dimension temporelle
Bas Gauche : Trace dans la dimension thématique Bas Droite : Trace dans la dimension spatiale

La figure 5.14 illustre la trace d'interaction d'un utilisateur de type **calme** : il n'interagit que peu avec le musée. Par contre, il reste engagé longtemps dans chacune de ces interactions. Nous supposons que ce type d'utilisateur privilégie la lecture d'informations précises et détaillées plutôt que la consultation d'informations variées. Là encore, le système a suivi le rythme de l'utilisateur en ne recommandant que rarement de nou-

veaux concepts.

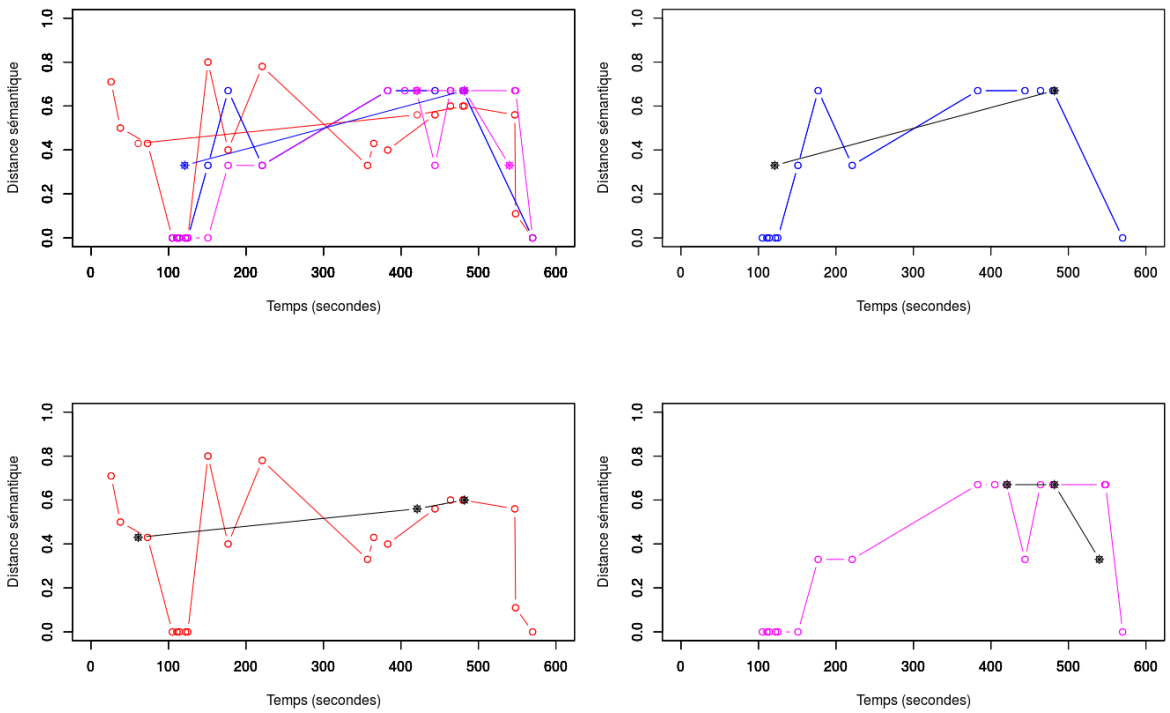


Figure 5.14 – Trace d'interaction d'un explorateur calme
Haut Gauche : Trace dans toutes les dimensions Haut Droite : Trace dans la dimension temporelle
Bas Gauche : Trace dans la dimension thématique Bas Droite : Trace dans la dimension spatiale

La figure 5.15 représente la trace d'interaction d'un utilisateur de type **explorateur en profondeur**. Il a des centres d'intérêt spécifiques et ne s'est intéressé qu'à des concepts sémantiquement proches. Même s'il change parfois de centre d'intérêt, il l'approfondit avant d'en changer à nouveau (voir Figure 5.15 à droite). Le système propose ici des concepts qui sont proches sémantiquement des centres d'intérêt de l'utilisateur. La distance sémantique entre deux concepts recommandés est inférieure à $0,3$. Ceci correspond bien au style d'exploration de l'utilisateur, tout en présentant régulièrement de nouveaux concepts (approfondissement de concepts).

La figure 5.16 illustre des traces d'interaction de deux utilisateur différents de type **guide**. Ils ont consulté des informations assez spécifiques mais ont changé de centres d'intérêt à certains moments lors de leur exploration (à $t = 290s$ pour la courbe de gauche et à $t = 310s$ pour la courbe de droite). Ils ont incité le système à suivre ses centres d'intérêt. Dans ce cas, le système, détectant le centre d'intérêt de l'utilisateur, fait également des propositions plus variées en terme de distance sémantique. Il suit donc bien l'évolution de l'utilisateur.

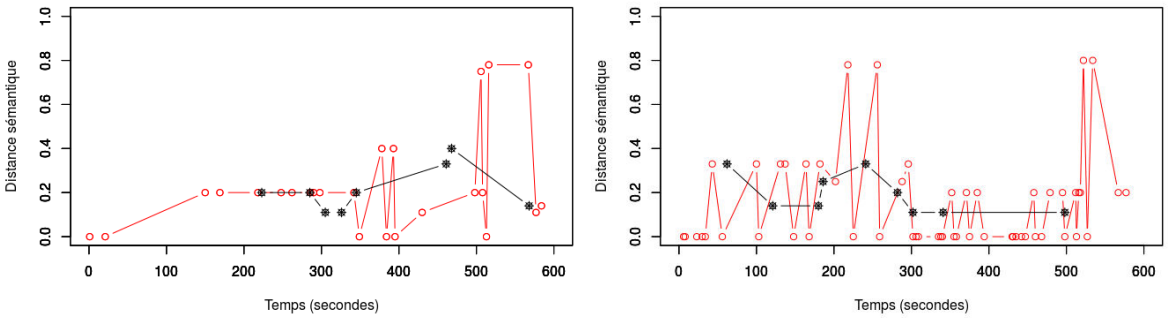


Figure 5.15 – Trace d'interaction d'un explorateur en profondeur

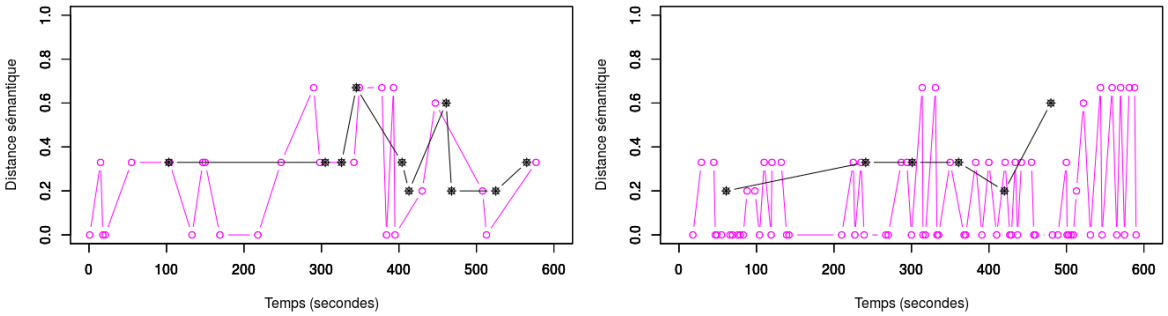


Figure 5.16 – Trace d'interaction des explorateurs guide

La figure 5.17 représente les traces d'interaction d'un utilisateur influencé par le système (« **suiveur** »). Deux explorations dans différentes dimensions sont présentées (dimension temporelle : courbe bleu et dimension thématique : courbe rouge). L'utilisateur a commencé par consulter des concepts qui sont proches sémantiquement. Le système a proposé des concepts qui sont proches sémantiquement. A certains moments (à t=$230s$ pour la figure de gauche et à t=$490s$ pour la figure de droite), le système a essayé d'influencer l'utilisateur en recommandant des concepts sémantiquement plus éloignés de ceux recommandés auparavant. L'utilisateur a alors changé de centre d'intérêt et vraisemblablement découvert de nouvelles informations recommandées par le système. Cette influence du système est l'effet de la combinaison des algorithmes de propagation de degré d'intérêt, du système de renfoncement des principes de stigmergie ainsi qu'un système de mémoire.

Lors de l'expérimentation *Exp1 [B]*, nous avons donné la possibilité aux participants de faire des commentaires libres. Le Tableau 5.5 en présente quelques uns. Ces commentaires illustrent d'une part l'intérêt que portaient les participants au système. Ce point conforte notre choix de changement de « terrain » pour mener l'expérimentation en

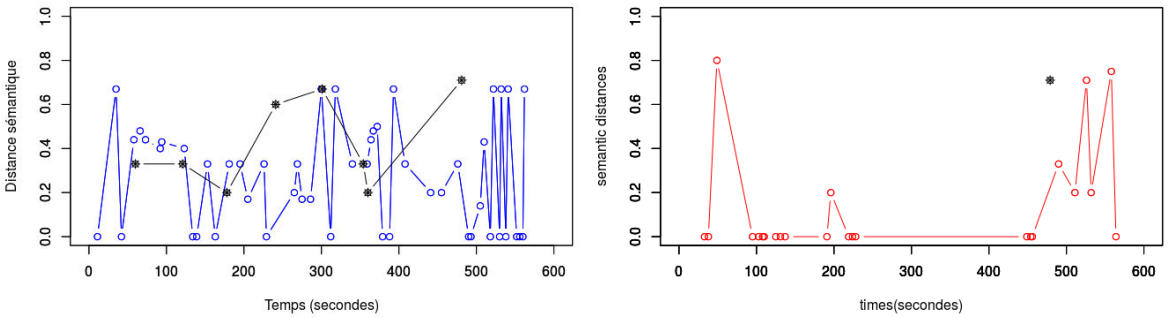


Figure 5.17 – Trace d'interaction d'un explorateur de type « suiveur »

nous adressant à des personnes, dès le départ, intéressées par le patrimoine. D'autre part, ils semblent montrer que les participants ont bien compris et ressenti la capacité du système à s'adapter tout en les guidant de façon relativement souple. Notons que ces commentaires sont corroborés par les statistiques des réponses aux questions (voir la discussion au niveau de la section 5.2.5).

Tableau 5.5 – Extrait de commentaires pour l'expérimentation *Exp1 [B]*

	Commentaires
C1	Difficultés à découvrir les éléments existants d'un patrimoine plus précis (ex : Château). Mais c'est une très bonne initiative pour découvrir le patrimoine « caché » d'un territoire. Cette petite expérimentation de 10 minutes m'a semblée bien trop courte !
C2	C'est peut-être un peu court pour bien voir les « effets » de l'adaptabilité à mes centres d'intérêts. Cela dit c'est une mine de renseignement qui méritent d'être investie par des écoles/collèges.
C3	Très intéressant, j'aurais pu passer encore des heures. je n'avais pas de thèmes précis et je suis partie à la découverte.
C4	Belle application pour découvrir des lieux et cela donne envie de les voir en réels.
C5	La démarche me semble vraiment intéressante. Pourrait-elle être utilisée pour d'autres aspects du patrimoine ? Par exemple pour présenter des collections de costumes traditionnels.
C6	J'ai apprécié la visite dans ce musée et ai compris au bout de trois salles environ qu'elles s'adaptaient aux images que je regardais. Très rapidement, une nouvelle salle s'ouvrant, on est partagé entre le fait d'aller de suite dans cette nouvelle salle et rester faire le tour de chaque point présenté.

▶ **Résultats de l'expérimentation *Exp2***

Les résultats de l'expérimentation *Exp2 [B]* comme ceux de l'expérimentation *Exp1 [B]* sont classés en deux catégories : les résultats de l'analyse des traces (mesures objectives) et les réponses des participants aux différentes questions (mesures subjectives).

Analyse des traces d'interaction

Les traces d'interaction des utilisateurs nous permettent de comparer des informations telles que le nombre d'objets consultés ou le nombre de salles visitées en 2D versus 3D.

La figure 5.18 illustre le fait que les objets consultés par les participants sont moins nombreux avec le musée virtuel 2D qu'avec le musée virtuel 3D. Pour valider ces résultats, nous avons utilisé le **test de Wilcoxon**. Nous avons obtenu une probabilité p qui est égale à $0,001356$. Nous pouvons conclure que la valeur médiane du nombre d'objets consultés est significativement différente en 3D qu'en 2D.

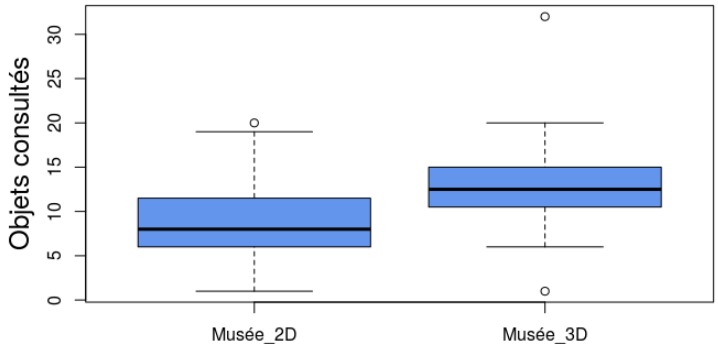


Figure 5.18 – Boxplot sur le nombre d'objets consultés en 2D et en 3D

La figure 5.19 illustre que les valeurs médianes du nombre de salles visitées avec le musée virtuel 3D et le musée virtuel 2D sont similaires. Pour confirmer cette affirmation, nous avons utilisé le **test de Student pour les données appariées** afin de comparer les moyennes des salles visitées pour les deux échantillons et nous avons obtenu une probabilité $p = 0,4789$ qui confirme l'hypothèse nulle selon laquelle les deux moyennes ne sont pas différentes. Le nombre moyen de salles visitées est égal à 3 pour les deux interfaces, ce qui est relativement faible. Ceci est dû à la faible durée de passation. Contrairement à *Exp1 [B]*, il ne s'agissait pas ici de valider des aspects d'adaptation mais simplement de faire une comparaison entre 2D et 3D.

Réponses aux questions

La question **q5** consistait à demander aux participants si le musée virtuel 3D suscite plus de découvertes d'informations que le musée virtuel 2D. Pour cette question, les réponses des participants sont réparties comme suit : 0% n'étaient pas d'accord, $12,90\%$ des participants n'avaient pas d'avis, $38,71\%$ étaient d'accord, $48,39\%$ étaient complè-

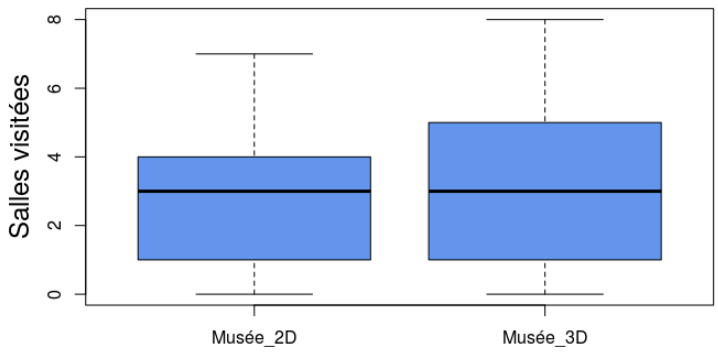


Figure 5.19 – Boxplot sur le nombre de salles visitées en 2D et en 3D

tement d'accord. Nous pouvons voir sur la figure 5.20 que la majorité des participants étaient d'accord avec le fait que la 3D permet de découvrir davantage d'informations que la 2D. Après avoir regroupé les réponses en deux catégories (catégorie 1 : pas du tout d'accord, pas d'accord et pas d'avis ; catégorie 2 : d'accord et tout à fait d'accord), nous avons utilisé le **test de proportionnalité** pour valider l'hypothèse nulle selon laquelle les deux catégories de réponses ont la même proportion. Nous avons obtenu une valeur de probabilité p qui est égale à $1,698 * 10^{-5}$, qui est significativement inférieure à $0,05$. Par conséquent, l'hypothèse nulle est rejetée et nous pouvons confirmer que la proportion de réponses dans la *catégorie 2* pour cette population est supérieure à 50%. Cela permet de confirmer ce que nous avons constaté sur la figure 5.20.

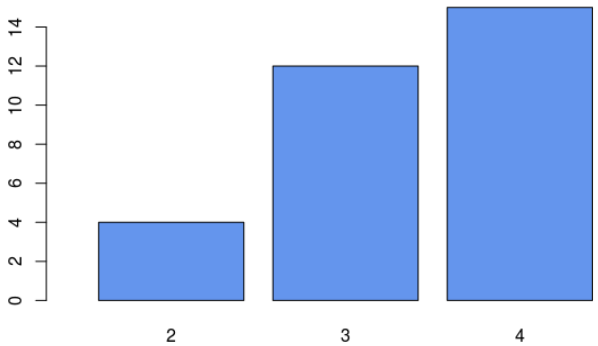


Figure 5.20 – Réponses à la question **q5**
0 : Pas du tout d'accord 2 : Pas d'avis
1 : Pas d'accord 3 : D'accord
4 : Tout à fait d'accord

A propos de la question sur le regroupement des informations (**q6**), $84,64\%$ des participants ont confirmé que le musée virtuel 3D est meilleur que le musée virtuel 2D. La répartition des réponses est illustrée par la figure 5.21. Après avoir utilisé le **test de proportionnalité**, nous avons obtenu une probabilité $p = 0,000439$ qui confirme que la différence entre les deux proportions est significative.

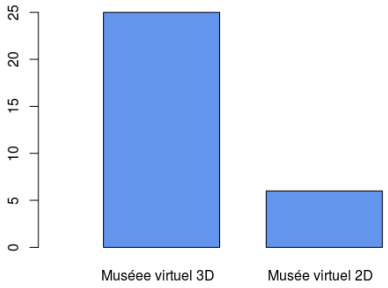


Figure 5.21 – Réponses à la question **q6**

Concernant la question sur le guide d'exploration dans les musées virtuels (**q7**), $25,80\%$ des participants n'étaient pas d'accord sur le fait que le musée virtuel 3D donne plus de repères que le musée virtuel 2D, $3,22\%$ n'étaient pas du tout d'accord, $38,71\%$ étaient d'accord et $32,27\%$ étaient complètement d'accord (voir Figure 5.22). Nous avons utilisé le **test de proportionnalité** en regroupant les réponses en deux catégories : catégorie 1 (pas du tout d'accord et pas d'accord) et catégorie 2 (d'accord et tout à fait d'accord). Il permet de voir s'il y a une différence significative entre les proportions des deux catégories de réponses. Le test nous a retourné une valeur de probabilité p qui est égale à 0.01472, qui est inférieure à $0,05$. L'hypothèse nulle est donc rejetée et nous pouvons affirmer qu'il y a une différence significative entre les proportions des deux catégories de réponses.

La question **q8** consistait à demander aux participants s'ils ont préféré explorer les données en musée virtuel 3D ou en musée virtuel 2D. D'après les réponses qu'ils ont données : $84,64\%$ ont préféré explorer les données en musée virtuel 3D. La distribution des réponses est identique à celle de la question **q6**. En utilisant le **test de proportionnalité**, nous avons obtenu une probabilité faible $p = 0,000439$ qui confirme le résultat.

La dernière question (**q9**) concernait l'efficacité de l'exploration en demandant aux participants si la 2D est meilleure que la 3D. La répartition des réponses des participants se présente comme suit : $12,90\%$ n'étaient pas du tout d'accord, $41,93\%$ n'étaient pas d'accord, $38,71\%$ étaient d'accord et $6,46\%$ étaient complètement d'accord. Nous pouvons voir sur la figure 5.23 que la proportion des participants qui n'étaient pas d'accord

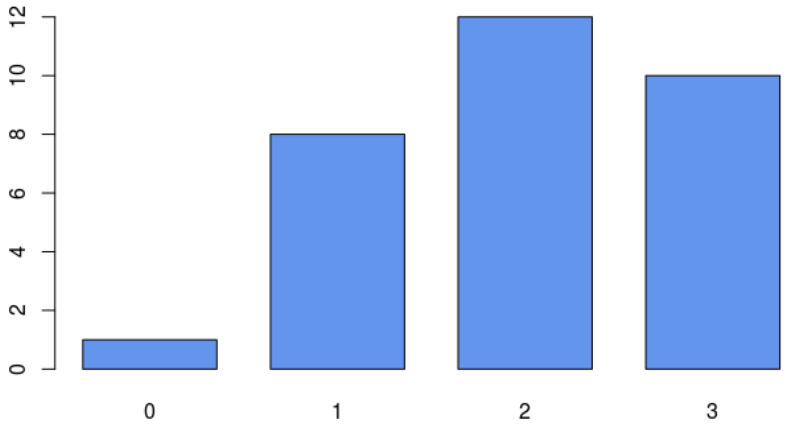


Figure 5.22 – Réponses à la question **q7**
0 : Pas du tout d'accord 2 : D'accord
1 : Pas d'accord 3 : Tout à fait d'accord

Tableau 5.6 – Extrait de commentaires pour l'expérimentation *Exp2 [B]*

	Commentaires
C1	D'un point de vue personnel je préfère la 2D car peut être plus simple à utiliser même si peut être moins complète. En tout cas c'est un bel outil
C2	je pense qu'on perd moins de temps à visualiser en 3D et on a une utilisation plus ludique.
C3	Je trouve l'exploitation des données en 3D plus ludique et active. Les apports théoriques sont clairs et précis. Ce projet permet une approche de la découverte d'un patrimoine en péril.
C4	La 3D m'a paru plus ludique mais pas plus efficace.

à l'affirmation est approximativement égale à ceux qui étaient d'accord. Pour le confirmer statistiquement, nous avons regroupé les réponses en deux catégories et nous avons appliqué le **test de proportionnalité**. Nous avons obtenu une valeur de probabilité qui est égale à 0.7634. L'hypothèse nulle est alors acceptée. On peut considérer globalement que 50% des participants n'étaient pas d'accord et 50% étaient d'accord avec l'affirmation initiale.

Le Tableau 5.6 indique quelques commentaires que nous avons extraits pour l'expérimentation finale *Exp2 [B]*. Ils illustrent quelques explications sur le fait que les avis soient partagés.

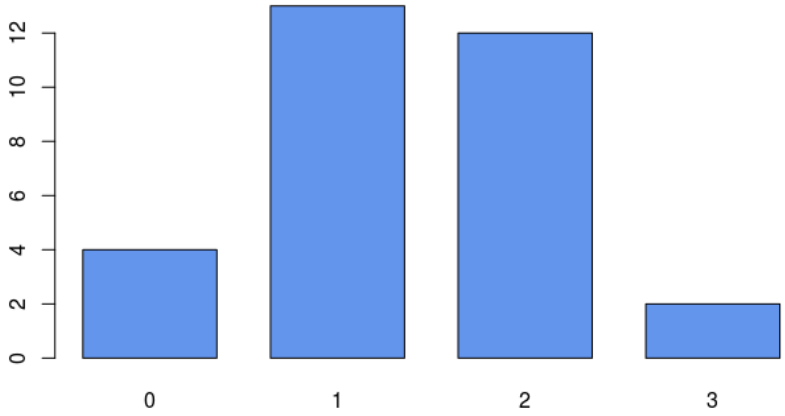


Figure 5.23 – Réponses à la question **q9**
0 : Pas du tout d'accord 2 : D'accord
1 : Pas d'accord 3 : Tout à fait d'accord

5.2.5 Discussion

Les résultats présentés au niveau de la section 5.2.4 nous permettent d'évaluer nos hypothèses **H1** et **H2** à partir d'observations spécifiques, de mesures objectives que de mesures subjectives via des statistiques. Des réponses aux questions ouvertes nous permettent de renforcer notre interprétation des résultats. Rappelons que nous avons réussi à recruter une diversité importante de participants en termes d'âge et de familiarité de jeux vidéo mais qu'ils étaient plus sensibles aux thématiques du patrimoine que les participants de la première expérimentation Exp_A. Cela joue un rôle un important pour étudier les réponses aux questions.

▶ A propos de *Exp1 [B]*

Les résultats de la question **q1** (voir Tableau 5.4) permettent d'avoir la confirmation que le système est capable de déterminer les informations proches et éloignées des centres d'intérêt des participants (hypothèse **h1.1 [B]**). Ils nous permettent d'affirmer qu'il y a une relation significative entre les jugements des participants et les propositions du système. Cela nous permet de dire que la combinaison de l'analyse des interactions et des enchaînements des interactions avec des connaissances a priori est une bonne solution pour analyser les comportements des utilisateurs.

Même s'il y a des relations significatives entre les évaluations des utilisateurs et du système sur la pertinence des concepts, les réponses des participants aux questions **q2** et **q3** montrent qu'il n'était pas évident pour eux de constater que leurs comportements influençaient le système (hypothèse **h1.2 [B]**). La proportion des participants

qui ne sont pas d'accord est approximativement égale à la proportion de ceux qui sont d'accord d'après des tests statistiques.

— La première explication de ces résultats est liée à la durée d'exploration qui est courte. Une durée de 10 minutes est insuffisante pour laisser les participants percevoir l'expansion progressive du musée correspondant à ses interactions. Cela est appuyé par des commentaires de certains participants (voir Tableau 5.5 C1, C2 et C3). Nous aurions aimé avoir des explorations plus longues. Malheureusement, après plusieurs refus de notre demande par certains visiteurs, à cause du temps, nous avons dû diminuer le temps d'exploration à 10 minutes. Il n'est donc pas réellement surprenant pour nous que certains participants n'aient pas vu clairement le fonctionnement de notre système.

— Une deuxième explication concerne les réponses à la question **q3**. La répartition quasi-équitable des réponses est due à la non-utilisation des outils (1/3 des participants n'ont pas utilisé des outils et la moitié ont utilisé au maximum 2 fois, voir Figure 5.24), mais également à la non-compréhension de leur utilité. Cette dernière a été confirmée par certaines des réponses aux questions ouvertes. Certains participants ont espéré trouver immédiatement des objets correspondant à ce qu'ils ont indiqué avec les outils. Ils ont cru que notre système fonctionnait comme des outils de recherche (voir Tableau 5.5 C1). Cela pose un problème parce que notre système n'est pas dédié à « la recherche » d'informations explicites. Il prend en considération toutes les interactions des utilisateurs et pas seulement les derniers usages des outils pour favoriser une « exploration ». C'est le système d'apprentissage qui détermine à quel moment recommander une nouvelle information.

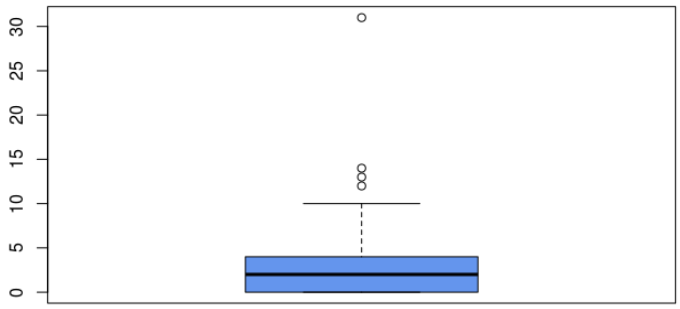


Figure 5.24 – Fréquences d'utilisation des outils pendant l'exploration en 3D

Cependant, une grande majorité des participants était fortement d'accord sur l'hypothèse selon laquelle le système leur permet de découvrir de nouvelles informations

auxquelles ils n'auraient pas pensé ou pas prêté attention auparavant (hypothèse **h1.4 [B]**). Cela est aussi appuyé par des commentaires sur l'intérêt qu'ils ont porté au système et à la démarche globale. Cela constitue un résultat encourageant.

Concernant les mesures objectives, les figures 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, et 5.17 illustrent la capacité du système à s'adapter aux différents profils d'utilisateur (hypothèse **h1.3 [B]**).

Si l'utilisateur est curieux et préfère explorer des informations diverses pendant peu de temps, le système lui suggère diverses informations en peu de temps. La figure 5.13 illustre que l'utilisateur peut changer souvent de concepts dans une dimension (ici la dimension temporelle (courbe bleue) et la dimension thématique (courbe rouge)) et change peu pour d'autres dimensions (ici la dimension spatiale). Le centre d'intérêt ne change pas beaucoup dans la dimension spatiale pour la majorité des participants parce que nous avons adopté l'hypothèse que tous les participants partent d'une même salle qui a pour thématique «*Saint-Goazec*» (commune dans laquelle l'expérimentation a eu lieu et que les participants veulent visiter). Cela nous permet de comparer les différents types d'exploration des participants partant d'une même salle. En effet, les objets consultés par les participants ont des liens avec cette commune ou avec ses communes voisines, le système propose alors, dans cette dimension, des concepts sémantiquement proches des concepts consultés. Nous considérons que ce type d'utilisateur veut parcourir/découvrir diverses informations sur des périodes de temps et des thématiques sur un territoire donné. Ce type d'utilisateur ne reste pas longtemps devant un objet pour lire des informations mais il s'intéresse peut-être à consulter les images ou les résumés et il passe à d'autres objets. Nous pouvons déduire, à partir de la figure 5.13, que le système est capable de suivre l'évolution de changement d'intérêt des utilisateurs. Ceci pourrait expliquer que si l'utilisateur consulte deux concepts qui ne sont pas voisins sémantiquement, des phéromones sont déposées sur les arcs qui les relient au niveau des structures sémantiques et c'est cette intensité de lien qui permet également au système de proposer des concepts qui ne sont pas sémantiquement proches. Et de suivre l'évolution de l'exploration de l'utilisateur.

Un autre type d'exploration qui est un peu le contraire de ce qui est présenté au niveau de la figure 5.13 est ce qui est illustré sur la figure 5.14. Ce type d'utilisateur n'a pas fait beaucoup d'interactions et n'a pas changé très vite d'informations à consulter. Il a pris son temps pour lire des informations sur quelques objets. Nous pouvons voir que le système suit également la vitesse d'exploration de l'utilisateur. Il n'a pas proposé beaucoup de concepts pour ne pas perturber l'utilisateur. Cela s'explique par le fait que le système a besoin de plus d'informations sur les interactions de l'utilisateur pour pouvoir proposer de nouveaux concepts. si l'utilisateur interagit peu ou si la durée entre deux interactions est importante, la pertinence de certaines informations diminue au fil

du temps. Ce qui diminue la fréquence de proposition du système. Et cela lui permet d'ajuster sa vitesse de recommandation par rapport à la vitesse d'exploration de l'utilisateur.

Nous pouvons dire que l'utilisateur qui est représenté sur la figure 5.15 a fait une exploration en profondeur, tandis que l'utilisateur qui est représenté sur la figure 5.13 a fait une exploration en largeur si on se réfère aux structures sémantiques. La courbe à gauche sur la figure 5.15 illustre que l'utilisateur a consulté des informations aux alentours d'un concept particulier. On voit que le système suit l'évolution de l'utilisateur : il propose des concepts sémantiquement proches lorsque l'utilisateur affine son exploration.

La figure 5.16 illustre que même si l'ensemble des concepts décrivant la salle de départ est fixé par un concept (« Finistère ») de la dimension spatiale (courbe rose), l'utilisateur a la possibilité de changer de territoire à explorer. Deux cas peuvent se présenter pour expliquer ce changement : soit l'utilisateur a utilisé l'outil carte et a spécifié l'endroit qu'il voulait explorer, soit il a consulté des informations liées à d'autres communes qui ne sont pas dans le département « Finistère ». Ces dernières sont introduites dans le musée à partir des interactions. Nous considérons que les concepts consultés ne sont pas dans le même département que l'ensemble des concepts décrivant la salle initiale parce que les distances sémantiques des piques sont approximativement égales à $0,8$, ce qui est élevé et est proche de 1. Nous pouvons constater à partir des courbes de la figure 5.16 que le système a détecté ce changement de centres d'intérêt de l'utilisateur et a proposé, après quelques minutes des concepts sémantiquement éloignés de ce qu'il a proposé auparavant pour s'adapter au profil perçu de l'utilisateur. Le temps de réaction du système dépend du type d'interaction et de la fréquence des interactions.

Enfin, le dernier type d'exploration est illustré sur la figure 5.17. Cette figure permet de montrer que le système est capable d'influencer l'utilisateur en l'invitant à découvrir de nouvelles informations et à élargir sa zone d'exploration. Même si l'utilisateur explore un concept particulier pendant longtemps, le système est capable de lui proposer des concepts sémantiquement éloignés de ce qu'il a proposé auparavant et l'utilisateur peut être influencé. On voit que l'utilisateur a consulté des concepts sémantiquement éloignés de ce qu'il a consulté grâce à la proposition du système. Nous pouvons constater également à partir de cette figure que même si l'utilisateur n'interagit pas pendant un certain moment sur une dimension donnée, le système est capable de recommander des concepts. Deux cas peuvent expliquer cette influence du système. Le premier est que le concept recommandé n'est pas parmi les concepts consultés par l'utilisateur mais sa pertinence est devenue importante grâce au système de propagation de pertinence et/ou au système de renforcement de l'algorithme basé sur la stigmergie. Le second est que l'utilisateur demande de nouvelles informations alors qu'il n'interagit

pas pendant un certain temps. Dans ce cas, les concepts moins pertinents ont une probabilité d'être recommandés et cela grâce à l'implémentation des algorithmes basés sur des systèmes de mémoires.

Ces différentes traces d'interaction nous permettent de valider l'hypothèse (**H1**) selon laquelle non seulement notre système s'adapte en temps réel aux centres d'intérêt de l'utilisateur mais également qu'il est capable d'influencer l'utilisateur pour découvrir de nouvelles informations. Nous avons vu à partir des commentaires que les participants ont apprécié notre approche et ont proposé son application dans d'autres domaines autre que le patrimoine (voir Tableau 5.5 C2 et C5).

▶ A propos de *Exp2 [B]*

Rappelons que l'expérimentation *Exp2* consistait à évaluer le musée virtuel 3D par rapport au musée virtuel 2D. Après une étude statistique sur les traces d'interaction des utilisateurs, nous avons déduit que le musée virtuel permet de découvrir plus d'informations que le musée virtuel 2D. Le nombre médian des objets consultés des deux interfaces est significativement différent. Ces résultats nous permettent d'affirmer que le musée virtuel 3D permet de percevoir rapidement des objets. Cela est également appuyé par un commentaire (voir Tableau 5.5 C2). La taille des objets augmente en fonction de leur distance par rapport à l'utilisateur. L'auto-organisation des objets attire son attention qui lui permet de découvrir de nouveaux objets. Concernant les nombres de salles visitées, ils sont approximativement égaux pour les deux interfaces. Même si 71% des participants ne sont pas familiarisés avec les jeux vidéos, leurs vitesses d'exploration des salles sont presque identiques. Ce qui nous permet de dire que la non-familiarité avec les interfaces 3D n'est pas vraiment un obstacle pour explorer des données avec le musée virtuel 3D.

Les réponses à la question **q5** permettent de comparer la qualité du musée virtuel 3D et du musée virtuel 2D en terme d'influence d'attention. $87,1\%$ des participants ont confirmé que le musée virtuel 3D permet d'attirer plus d'attention que le musée virtuel 2D. Cette mesure subjective en combinaison avec une mesure objective (nombre d'objets consultés) permet de valider l'hypothèse **h2.1 [B]**.

Concernant la question **q6**, $84,64\%$ des participants ont répondu que le musée virtuel 3D présente mieux le regroupement de données que le musée virtuel 2D. Et la même proportion des participants ont préféré exploré les données en musée virtuel 3D (**q8**). Des minorités des participants ont choisi le musée virtuel 2D à cause de son simplicité. Cela est également appuyé par des commentaires (voir Tableau 5.5 C1). Nous avons pu valider, à partir des tests statistiques, que la différence de répartition de réponses pour ces deux questions est significativement grande.

En terme de guidage (**q7**), 71% des participants ont trouvé que le musée virtuel 3D donne plus de repère que le musée virtuel 2D lors de l'exploration. Statistiquement, nous avons adopté une hypothèse que 50% des participants trouvent que le musée virtuel 3D donne plus de repère. Après vérification par un test, l'hypothèse a été rejetée par rapport à la population étudiée. Les réponses aux questions **q6**, **q7** et **q8** permettent de valider l'hypothèse **h2.2 [B]**.

Enfin, concernant l'efficacité d'exploration en musée virtuel 2D par rapport au musée virtuel 3D (**q9**), les participants sont vraiment partagés. Près de la moitié étaient d'accord. Cela est validé statistiquement. Les résultats indiquent qu'il n'y a pas de préférences spécifiques pour la 2D ou la 3D. L'hypothèse **h2.3 [B]** n'est alors pas validée.

Nous avons identifié d'autres points intéressants lors de l'analyse des résultats d'expérimentation, notamment l'absence de liens entre l'appréciation d'une interface et l'âge ou la familiarité avec les jeux vidéos.

5.3 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre 5 les évaluations de certaines fonctionnalités de notre approche. Deux expérimentations ont été réalisées : une à mi-parcours de la thèse et une autre vers la fin de la thèse. Pour chaque expérimentation, nous avons décrit les hypothèses évaluées, les participants, le déroulement de l'expérimentation et les résultats. La première expérimentation nous a permis d'identifier différents problèmes relatifs à la version préliminaire de notre approche (au niveau du modèle, des hypothèses et de la tâche demandée) et d'ajouter des éléments d'amélioration pour la seconde expérimentation. Les résultats de ces expérimentations permettent de valider globalement les hypothèses sur la co-évolution entre le système et l'utilisateur qui est le principe de base de notre approche. Notons que les évaluations lors de ces expérimentations ne couvrent pas l'ensemble des hypothèses par rapport à notre motivation initiale. Ceci est dû à la courte durée des expérimentations, mais surtout à la complexité d'évaluation de certaines hypothèses comme par exemple, celle liée à l'aide à la compréhension. En effet, nous n'avons pas pu étudier dans quelle mesure les outils de l'environnement 3D permettent à l'utilisateur de comprendre le comportement du système.

III

Conclusion

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES .. 127

6.1 Conclusion

6.2 Perspectives

Annexes 139

A Recommandation de concepts 140

B Échantillonnage probabiliste 143

C Tests statistiques 145

D Traces d'interactions et de recommandations 147

D.1 Exemple d'une trace d'interaction

D.2 Exemple d'une trace de recommandation

E Publications 150

6 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail de thèse, nous avons proposé une approche co-évolutive humain - système pour l'exploration de bases de données. Pour mettre en œuvre cette approche, différentes études, applications et évaluations ont été réalisées. La section 6.1 dresse une conclusion générale sur ce travail et aborde les limites de notre approche tant au niveau du modèle qu'au niveau des évaluations. La section 6.2 présente les différentes directions que nous pourrions prendre pour poursuivre ce travail.

Sommaire

6.1	**Conclusion**	**127**
6.2	**Perspectives**	**130**
6.2.1	Perspectives à court terme	130
6.2.2	Perspectives à long terme	131

6.1 Conclusion

La quantité de données à notre disposition augmente de plus en plus. L'exploitation de ces données devient difficile car des informations qui peuvent être importantes ne sont pas accessibles par la seule consultation des données. Elles sont en fait relatives aux multiples liens plus ou moins complexes existant entre les données. Passer par une exploration de données peut alors contribuer à l'appréhension de ces liens. Notre motivation dans cette thèse était de proposer un outil permettant d'explorer une base données pour aider à comprendre un domaine ou un phénomène particulier. La difficulté ici tient moins à l'aspect quantitatif (quantité de données ou nombre de relations qu'elles entretiennent les unes avec les autres) qu'à l'aspect qualitatif (nature des relations entre les données qui sont extraites de façon implicite ou explicite). Ce constat nous conduit à proposer un modèle (voir chapitre 3) et à le mettre en œuvre sous différentes versions pour montrer sa

généricité (voir chapitre 5). Les hypothèses du travail réalisé sont validées par plusieurs expérimentations dont la réalisation et l'analyse des résultats sont présentées dans le chapitre 5.

Rappelons les questions de recherches qui ont été soulevées au chapitre 1 :

— Comment adapter dynamiquement l'interface en fonction des comportements de l'utilisateur et de son évolution afin de l'aider à comprendre et à avoir des repères pendant son exploration ?

— Quels algorithmes adopter pour évaluer, en temps réel, les intentions de l'utilisateur en tenant en compte d'une part (i) de son profil et d'autre part (ii) des connaissances a priori, afin de générer des informations pertinentes ?

— Quelle méthode mettre en œuvre pour la visualisation de données pour que l'utilisateur ait une vision synthétique sur les liens complexes entre elles ?

Il s'agit ici d'étudier un système de présentation d'information capable de s'adapter à la fois au contenu et aux intentions de l'utilisateur. La mise en œuvre de notre approche impose des études sur les domaines suivants : la visualisation de données, la recommandation de données et l'adaptabilité du système à l'utilisateur (voir chapitre 2).

Le principe de base de notre travail est donc l'établissement d'un couplage fort entre un système d'information et son utilisateur. Pour cela, nous nous inspirons du paradigme de l'énaction et d'une de ses métaphores : « la marche pour chemin ». Selon cette métaphore, deux processus interagissent en temps réel : les actions de l'utilisateur (la marche) sont contraintes par l'organisation des données dans l'espace qui lui sont présentées (le chemin) et cette organisation (le chemin) est modifiée par les actions de l'utilisateur (la marche). L'approche proposée préconise alors la co-évolution entre l'utilisateur et son environnement pour favoriser une compréhension des données de façon personnalisée.

Notre approche est basée sur deux hypothèses :

— **Incarnation en 3D :** la représentation des éléments de la base de données par des objets 3D facilite la compréhension des relations qui existent entre ces objets.
— **Auto-organisation :** l' auto-organisation des informations conjointement avec l'analyse des comportements de l'utilisateur favorise la co-évolution.

La mise en œuvre du système de couplage proposé repose sur deux espaces : un espace d'interaction et un espace de recommandation. L'espace d'interaction permet à l'utilisateur de percevoir les incarnations de certaines informations de la base de données et d'interagir avec elles. Tandis que l'espace de recommandation est constitué par trois éléments : une représentation de l'utilisateur (mise à jour périodiquement ou à chaque interaction), la base de données et des structures sémantiques. C'est à partir de ces trois

entités que les nouvelles informations à présenter sont sélectionnées, incarnées par des objets 3D puis introduites dans l'espace d'interaction.

Nos contributions aux systèmes d'information adaptatifs sont les suivantes :

— L'utilisation du paradigme de l'énaction.

— La proposition d'une métaphore visuelle 3D : les informations résultant du processus de recommandation sont représentées par des objets 3D dont les caractéristiques dépendent de la métaphore choisie. Leurs positions respectives, celle de l'utilisateur, ainsi que leurs tailles respectives représentent des informations concernant leurs relations sémantiques ou leur pertinence. Les structures sémantiques sont également incarnées par le biais d'objets 3D, eux mêmes sous formes de métaphores (par exemple, carte topologique, frise chronologique). Cette incarnation des structures sémantiques présente un double avantage : elle permet à l'utilisateur de percevoir les évaluations de ses interactions par le système mais également d'indiquer de façon plus directe ses intentions.

— La combinaison de différentes techniques de visualisation : « focus+contexte » (taille des objets par rapport à l'utilisateur), « multi-dimensionnelles » (évolution de l'environnement en fonction des interactions), regroupement spatial d'informations.

— La proposition d'une fonction d'évaluation des concepts en tenant en compte : d'une part des intentions de l'utilisateur (ses centres d'intérêt et son style de navigation) et d'autre part des connaissances a priori (structures sémantiques).

— L'utilisation d'une technique d'échantillonnage de données permettant de récupérer des informations pertinentes relativement à un ensemble de concepts mais également d'introduire des données permettant à l'utilisateur d'élargir ses centres d'intérêt.

— L'implémentation des différents algorithmes permettant d'implémenter le principe de la co-évolution : pondération, activation-propagation, principe de stigmergie (renforcement, évaporation) et système de mémoire (ou système d'oubli).

La mise en œuvre et l'évaluation de notre approche a permis d'obtenir les résultats suivants :

— **Approche co-évolutive** : les expérimentations réalisées nous ont permis de valider statistiquement des hypothèses selon lesquelles notre système est capable de suivre l'évolution du changement des centres d'intérêt de l'utilisateur et qu'il est également capable d'influencer l'utilisateur de sorte qu'il puisse changer de centres d'intérêt.

— **Intérêt de la 3D sur la 2D** : les résultats des expérimentations permettent de valider que les participants ont préféré utiliser le musée virtuel 3D plutôt que le site web. Ils permettent également de valider le fait que l'exploration à la 3D permet de consulter plus d'objets qu'à la 2D.

— **Système générique** : nous avons pu montrer la généricité de notre approche grâce à son application avec différents types d'interfaces (2D, 3D et immersive), ainsi qu'avec une autre base de données (base de données des livres publiés par l'ACM).

Les principales limites de ce travail sont les suivantes :

— Par rapport à la motivation initiale, l'hypothèse selon laquelle notre approche co-évolutive aide à la compréhension des liens complexes entre les données n'a pas pu être évaluée. De plus, la durée des sessions d'expérimentation était très courte et ceci a pu empêcher les utilisateurs d'exploiter tout le potentiel du système, voire de ne pas percevoir certains aspects de ses comportements adaptatifs.

— Concernant le fonctionnement du modèle, une des limites est le démarrage à froid. Si les informations proposées à l'utilisateur au début de son exploration ne l'intéressent vraiment pas, il ne sera pas capable de faire des choix pour amorcer le processus de recommandation. L'utilisateur se retrouvera alors dans un musée qui n'a pas d'intérêt pour lui. Une autre limite concerne le paramétrage : la majorité des valeurs des paramètres a été choisie de façon empirique. Par exemple, la fréquence de l'exécution des fonctions périodiques, ou les valeurs correspondant à chaque interaction pour évaluer l'intérêt de l'utilisateur.

6.2 Perspectives

Les limites mentionnées ci-dessus ouvrent donc des perspectives de futur travaux.

6.2.1 Perspectives à court terme

Pour que l'utilisateur perçoive l'adaptabilité du système, il faudrait faire des expérimentations sur le long terme, laissant aux utilisateurs le temps de se familiariser avec les

principes, de faire plusieurs sessions durant plusieurs jours. Dans le domaine de la formation par exemple, il serait intéressant d'évaluer l'aide à l'appréhension d'un domaine que peut apporter un tel outil. De même, pour savoir si notre approche aide à la compréhension des liens complexes entre les données, il serrait intéressant d'interviewer les participants pendant l'expérimentation.

Pour éviter le problème de démarrage à froid, il faudrait ajouter une fonctionnalité permettant à l'utilisateur d'intervenir lors de la spécification de l'état initial du musée pour l'aider à guider son exploration.

Toujours pour aider l'utilisateur, il serrait intéressant d'améliorer l'aspect bi-directionnel des flux d'informations des outils (saisie par l'utilisateur de ses préférences, présentation à l'utilisateur de ses préférences telles qu'elles sont perçues par le système).

Les traces d'usage obtenues durant les expérimentations peuvent être utilisées pour ajuster les paramètres du système. Comme par exemple le temps de mise à jour d'évaporation des phéromones, le temps moyen entre deux recommandations, le seuil de valeur pour décider qu'une information est pertinente.

Enfin, l'explicitation du fonctionnement du système semble également un point sur lequel il faut travailler. Plus l'utilisateur comprend pourquoi telle ou telle information lui a été suggérée, plus il comprend comment guider l'exploration. Pour cela, nous pensons séparer les informations qui correspondent approximativement à ses centres d'intérêt des informations qui ont été ajoutées pour l'inciter à élargir ses centres d'intérêt.

6.2.2 Perspectives à long terme

Pour le moment, chaque utilisateur a ses propres informations sur son profil et le système exploite séparément les informations de chaque utilisateur. La recommandation collaborative peut être considérée comme élément de généralisation de notre approche. Pour cela, tous les utilisateurs ou au moins les utilisateurs ayant les mêmes profils peuvent partager les mêmes ressources. Cela conduit à une autre perspective qui est la mise en ligne de l'application.

Actuellement, l'approche utilisant le modèle syntaxique et celle qui utilise le modèle sémantique fonctionnent séparément. La combinaison de ces deux modèles peuvent apporter des informations plus riches en terme de recommandation. Par exemple, si nous avons un ensemble d'éléments appartenant à une catégorie sémantique, l'utilisation du modèle syntaxique permettrait de renforcer les informations liées à leur similitude.

Une autre perspective concerne le développement d'outils auteur donnant la possibi-

lité à un utilisateur d'influencer les recommandations en exprimant son point de vue sur les relations sémantiques entre certains objets.

Nous pourrions étudier plus en détail la notion d'affordance pour guider l'utilisateur dans son exploration ou pour lui indiquer la pertinence d'une information par rapport à d'autres. Par exemple ajouter des systèmes de marquage au sol, qui montreraient les traces des chemins des utilisateurs dans l'environnement. Cela pourrait influencer un utilisateur à suivre un chemin déjà tracé, ceci en accord avec la métaphore de la marche pour chemin.

Enfin, comme nous l'avons montré au chapitre 4, notre approche est applicable à d'autres domaines. Elle pourrait facilement être transposée à tout domaine et plus particulièrement aux domaines impliquant de nombreuses données, liées entre-elles de façon complexe et dont il est difficile de saisir le sens.

Bibliographie

Aciar, Silvana, Debbie Zhang, Simeon Simoff et John Debenham (2007). “Informed recommender : Basing recommendations on consumer product reviews”. In : *IEEE Intelligent systems* 22.3 (cf. p. 30, 37).

Aligon, Julien, Fabrice Guillet, Julien Blanchard, Fabien Picarougne et Equipe Duke (2016). “Défi EGC 2016 : Analyse par Motifs Fréquents et Topic Modeling.” In : *EGC*, p. 395-406 (cf. p. 80).

Allen, I Elaine et Christopher A Seaman (2007). “Likert scales and data analyses”. In : *Quality progress* 40.7, p. 64 (cf. p. 100).

Athukorale, K., A. Medlar, A. Oulasvirta, G. Jacucci et D. Glowacka (2016). “Beyond Relevance : Adapting Exploration/Exploitation in Information Retrieval”. In : *21st annual meeting on Intelligent User Interface (IUI 2016)*. ACM (cf. p. 64).

Beldjoudi, Samia, Hassina Seridi et Catherine Faron Zucker (2017). “Personalizing and improving resource recommendation by analyzing users preferences in social tagging activities”. In : *Computing and Informatics* 36.1, p. 223-256 (cf. p. 31, 37).

Bonis, Bill, Spyros Vosinaki, Ioannis Andreou et Themis Panayiotopoulos (2013). “Adaptive virtual exhibitions”. In : *DESIDOC Journal of Library & Information Technology* 33.3 (cf. p. 3, 31, 32, 37, 65).

Bonnel, Nicolas, Vincent Lemaire, Cotarmanac’H Alexandre et Annie Morin (2006). “Effective organization and visualization of web search results”. In : *IASTED International Conference on Internet and Multimedia Systems and Applications (EuroIMSA’06)*. ACTA Press, p. 209-216 (cf. p. 3, 20, 21).

Calvary, Gaelle, Joëlle Coutaz, David Thevenin, Quentin Limbourg, Nathalie Souchon, Laurent Bouillon, Murielle Florins, Jean Vanderdonckt et al. (2002). “Plasticity of user interfaces : A revisited reference framework”. In : *In Task Models and Diagrams for User Interface Design*. Citeseer (cf. p. 40).

Card, Stuart K, George G Robertson et William York (1996). “The WebBook and the Web Forager : an information workspace for the World-Wide Web”. In : *Proceedings of the*

SIGCHI conference on Human factors in computing systems. ACM, 111-ff (cf. p. 18, 19).

Cavuoti, Stefano, Massimo Brescia et Giuseppe Longo (2014). “Data-Rich Astronomy : Mining Sky Surveys with PhotoRApToR”. In : *Proceedings of the International Astronomical Union* 10.S306, p. 307-309 (cf. p. 3).

Chen, Chih-Ming, Ling-Jiun Duh et Chao-Yu Liu (2004). “A personalized courseware recommendation system based on fuzzy item response theory”. In : *e-Technology, e-Commerce and e-Service, 2004. EEE'04. 2004 IEEE International Conference on*. IEEE, p. 305-308 (cf. p. 27, 36).

Chen, Jie, Shih-Lung Shaw, Hongbo Yu, Feng Lu, Yanwei Chai et Qinglei Jia (2011). “Exploratory data analysis of activity diary data : a space–time GIS approach”. In : *Journal of Transport Geography* 19.3, p. 394-404 (cf. p. 2, 14, 15).

Chen, Ting, Wei-Li Han, Hai-Dong Wang, Yi-Xun Zhou, Bin Xu et Bin-Yu Zang (2007). “Content recommendation system based on private dynamic user profile”. In : *Machine Learning and Cybernetics, 2007 International Conference on*. T. 4. IEEE, p. 2112-2118 (cf. p. 34, 37).

Chen, Zhikui, Zhuang Shao, Zhijiang Xie et Xiaodi Huang (2010). “An attribute-based scheme for service recommendation using association rules and ant colony algorithm”. In : *Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2010*. IEEE, p. 1-6 (cf. p. 33, 37, 67).

Chittaro, Luca, Lucio Ieronutti et Roberto Ranon (2006). “Adaptable visual presentation of 2D and 3D learning materials in web-based cyberworlds”. In : *The Visual Computer* 22.12, p. 1002-1014 (cf. p. 39).

Cho, Isaac, Wewnen Dou, Derek Xiaoyu Wang, Eric Sauda et William Ribarsky (2016). “VAiRoma : A visual analytics system for making sense of places, times, and events in roman history”. In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 22.1, p. 210-219 (cf. p. 3, 15).

Damiano, Rossana, Vincenzo Lombardo, Antonio Lieto et Davide Borra (2015). “Mind the red thread ! 3D metaphors for cultural heritage visualization”. In : *Digital Heritage, 2015*. T. 2. IEEE, p. 355-358 (cf. p. 57).

Davidson, James, Benjamin Liebald, Junning Liu, Palash Nandy, Taylor Van Vleet, Ullas Gargi, Sujoy Gupta, Yu He, Mike Lambert, Blake Livingston et al. (2010). “The YouTube video recommendation system”. In : *Proceedings of the fourth ACM conference on Recommender systems*. ACM, p. 293-296 (cf. p. 27, 36).

De Loor, Pierre, Kristen Manac'h et Jacques Tisseau (2009). “Enaction-based artificial intelligence : Toward co-evolution with humans in the loop”. In : *Minds and Machines* 19.3, p. 319-343 (cf. p. 52).

Dieberger, Andreas et Andrew U Frank (1998). “A city metaphor to support navigation in complex information spaces”. In : *Journal of Visual Languages & Computing* 9.6, p. 597-622 (cf. p. 20).

Dorigo, Marco, Eric Bonabeau et Guy Theraulaz (2000). “Ant algorithms and stigmergy”. In : *Future Generation Computer Systems* 16.8, p. 851-871 (cf. p. 67).

Dréo, Johann et Patrick Siarry (2003). “Diverses techniques d’optimisation inspirées de la théorie de l’auto-organisation dans les systemes biologiques”. In : *Journée optimisation par essaim particulaire (OEP’2003)* 2 (cf. p. 66).

Elliott, J-M et H Decamps (1973). “Guide pour l’analyse statistique des échantillons d’invertébrés benthiques”. In : *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*. T. 9. 2. EDP Sciences, p. 79-120 (cf. p. 145).

Fayyad, Usama, Gregory Piatetsky-Shapiro et Padhraic Smyth (1996). “From data mining to knowledge discovery in databases”. In : *AI magazine* 17.3, p. 37 (cf. p. 2, 3).

Francisco-Revilla, Luis et Frank M Shipman III (2000). “Adaptive medical information delivery combining user, task and situation models”. In : *Proceedings of the 5th international conference on Intelligent user interfaces*. ACM, p. 94-97 (cf. p. 46, 49).

Gaitatzes, Athanasios, Dimitrios Christopoulos et Maria Roussou (2001). “Reviving the past : cultural heritage meets virtual reality”. In : *Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage*. ACM, p. 103-110 (cf. p. 56).

Gao, Qi, Junwei Yan et Min Liu (2008). “A semantic approach to recommendation system based on user ontology and spreading activation model”. In : *Network and Parallel Computing, 2008. NPC 2008. IFIP International Conference on*. IEEE, p. 488-492 (cf. p. 34, 37, 65).

Gatalsky, Peter, Natalia Andrienko et Gennady Andrienko (2004). “Interactive analysis of event data using space-time cube”. In : *Information Visualisation, 2004. IV 2004. Proceedings. Eighth International Conference on*. IEEE, p. 145-152 (cf. p. 3, 13, 14).

Grant, Christan Earl, Clint Pazhayidam George, Virupaksha Kanjilal, Supriya Nirkhiwale, Joseph N Wilson et Daisy Zhe Wang (2015). “A Topic-Based Search, Visualization, and Exploration System.” In : *FLAIRS Conference*, p. 43-48 (cf. p. 30, 36).

Greeno, James G (1994). “Gibson’s affordances.” In : (cf. p. 83).

Havre, Susan, Beth Hetzler et Lucy Nowell (2000). “ThemeRiver : Visualizing theme changes over time”. In : *Information Visualization, 2000. InfoVis 2000. IEEE Symposium on*. IEEE, p. 115-123 (cf. p. 13).

Heer, Jeffrey et Danah Boyd (2005). “Vizster : Visualizing online social networks”. In : *Information Visualization, 2005. INFOVIS 2005. IEEE Symposium on*. IEEE, p. 32-39 (cf. p. 19, 20).

Heer, Jeffrey et Stuart K Card (2004). “DOITrees revisited : scalable, space-constrained visualization of hierarchical data”. In : *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*. ACM, p. 421-424 (cf. p. 3, 16).

Holten, Danny (2006). “Hierarchical edge bundles : Visualization of adjacency relations in hierarchical data”. In : *IEEE Transactions on visualization and computer graphics* 12.5, p. 741-748 (cf. p. 18).

Huang, Anna (2008). “Similarity measures for text document clustering”. In : *Proceedings of the sixth new zealand computer science research student conference (NZCSRSC2008), Christchurch, New Zealand*, p. 49-56 (cf. p. 34).

Hudlicka, Eva et Michael D Mcneese (2002). “Assessment of user affective and belief states for interface adaptation : Application to an Air Force pilot task”. In : *User Modeling and User-Adapted Interaction* 12.1, p. 1-47 (cf. p. 42, 49).

Hung, Lun-ping (2005). “A personalized recommendation system based on product taxonomy for one-to-one marketing online”. In : *Expert systems with applications* 29.2, p. 383-392 (cf. p. 29, 36).

Huse, Susan M, David B Mark Welch, Andy Voorhis, Anna Shipunova, Hilary G Morrison, A Murat Eren et Mitchell L Sogin (2014). “VAMPS : a website for visualization and analysis of microbial population structures”. In : *BMC bioinformatics* 15.1, p. 41 (cf. p. 11, 12).

Jankun-Kelly, TJ et Kwan-Liu Ma (2003). “MoireGraphs : Radial focus+ context visualization and interaction for graphs with visual nodes”. In : *Information Visualization, 2003. INFOVIS 2003. IEEE Symposium on*. IEEE, p. 59-66 (cf. p. 3, 17, 18).

Kabassi, K et E Maravelakis (2015). “Walkthrough evaluation of a VR museum for the physical environment”. In : *Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA), 2015 6th International Conference on*. IEEE, p. 1-5 (cf. p. 56).

Keeble, RJ et Robert D. Macredie (2000). “Assistant agents for the world wide web intelligent interface design challenges”. In : *Interacting with computers* 12.4, p. 357-381 (cf. p. 40).

Loorak, Mona Hosseinkhani, Charles Perin, Noreen Kamal, Michael Hill et Sheelagh Carpendale (2016). “TimeSpan : Using visualization to explore temporal multi-dimensional data of stroke patients”. In : *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 22.1, p. 409-418 (cf. p. 3, 11).

Lukacova, Alexandra, Frantisek Babic et Jan Paralic (2014). “Building the prediction model from the aviation incident data”. In : *Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 2014 IEEE 12th International Symposium on*. IEEE, p. 365-369 (cf. p. 3).

Ma, Nan, Florent Laroche, Benjamin Hervy et Jean-Louis Kerouanton (2013). “Virtual conservation and interaction with our cultural heritage : Framework for multi-dimension model based interface”. In : *Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 2013*. T. 1. IEEE, p. 323-330 (cf. p. 57).

Mackinlay, Jock D, George G Robertson et Stuart K Card (1991). “The perspective wall : Detail and context smoothly integrated”. In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, p. 173-176 (cf. p. 12).

Matthews, Bryan, Santanu Das, Kanishka Bhaduri, Kamalika Das, Rodney Martin et Nikunj Oza (2013). “Discovering anomalous aviation safety events using scalable data mining algorithms”. In : *Journal of Aerospace Information Systems* (cf. p. 3).

Maturana, Humberto R, Francisco J Varela et François-Charles Jullien (1994). *L’arbre de la connaissance*. Ed. Addison-Wesley France (cf. p. 5).

Mazza, Riccardo (2009). *Introduction to information visualization*. Springer Science & Business Media (cf. p. 12).

Ngai, Eric WT, Li Xiu et Dorothy CK Chau (2009). “Application of data mining techniques in customer relationship management : A literature review and classification”. In : *Expert systems with applications* 36.2, p. 2592-2602 (cf. p. 3).

Piateski, Gregory et William Frawley (1991). *Knowledge Discovery in Databases*. Cambridge, MA, USA : MIT Press. isbn : 0262660709 (cf. p. 3).

Prechtel, N, S Münster, C Kröber, C Schubert et S Sebastian (2013). “Presenting cultural heritage landscapes-from GIS via 3D models to interactive presentation frameworks”. In : *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5 W* 2, p. 253-258 (cf. p. 56).

Preux, PM, M Druet-Cabanac, F Dalmay et A Vergnenègre (2003). “Qu’est-ce qu’un test paramétrique ?” In : *Revue des maladies respiratoires* 20.6-C1, p. 952-954 (cf. p. 145).

Proctor, Glenn et Chris Winter (1998). “Information flocking : Data visualisation in virtual worlds using emergent behaviours”. In : *International Conference on Virtual Worlds*. Springer, p. 168-176 (cf. p. 86).

Rajaonarivo, Landy, Matthieu Courgeon, Eric Maisel et Pierre De Loor (2017). “Inline Co-Evolution between Users and Information Presentation for Data Exploration”. In : *Proceedings of the 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces*. ACM, p. 215-219 (cf. p. 87).

Rajaonarivo, Landy, Eric Maisel et Pierre De Loor (2016). “An enactive based realtime 3D self-organization system for the exploration of a cultural heritage data base”. In : *Information Visualisation (IV), 2016 20th International Conference*. IEEE, p. 100-105 (cf. p. 87).

Reynolds, Craig W (1987). “Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model”. In : *ACM SIGGRAPH computer graphics*. T. 21. 4. ACM, p. 25-34 (cf. p. 86).

Riou, B et P Landais (1998). “Principes des tests d’hypothèse en statistique : α, β et P”. In : *Annales francaises d’anesthesie et de reanimation*. T. 17. 9. Elsevier, p. 1168-1180 (cf. p. 145).

Robertson, George G, Jock D Mackinlay et Stuart K Card (1991). “Cone trees : animated 3D visualizations of hierarchical information”. In : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. ACM, p. 189-194 (cf. p. 16).

Rosch, Eleanor, Lydia Thompson et Francisco J Varela (1991). “The embodied mind : Cognitive science and human experience”. In : (cf. p. 4).

Rothrock, Ling, Richard Koubek, Frederic Fuchs, Michael Haas et Gavriel Salvendy (2002). “Review and reappraisal of adaptive interfaces : toward biologically inspired paradigms”. In : *Theoretical issues in ergonomics science* 3.1, p. 47-84 (cf. p. 41, 49).

Ruotsalo, Tuukka, Jaakko Peltonen, Manuel Eugster, Dorota Głowacka, Ksenia Konyushkova, Kumaripaba Athukorala, Ilkka Kosunen, Aki Reijonen, Petri Myllymäki, Giulio Jacucci et al. (2013). “Directing exploratory search with interactive intent modeling”. In :

Proceedings of the 22nd ACM international conference on Conference on information & knowledge management. ACM, p. 1759-1764 (cf. p. 32, 33, 37).

Santos, Cassia Trojahn dos et Fernando Santos Osorio (2004). “AdapTIVE : an intelligent virtual environment and its application in e-commerce”. In : *Computer Software and Applications Conference, 2004. COMPSAC 2004. Proceedings of the 28th Annual International*. IEEE, p. 468-473 (cf. p. 44, 45, 49).

Stab, Christian, Kawa Nazemi et Dieter W Fellner (2010). “Sematime-timeline visualization of time-dependent relations and semantics”. In : *International Symposium on Visual Computing*. Springer, p. 514-523 (cf. p. 2, 10).

Stewart, John, John Robert Stewart, Olivier Gapenne et Ezequiel A Di Paolo (2010). *Enaction : Toward a new paradigm for cognitive science*. MIT Press (cf. p. 4).

Stock, Oliviero, Massimo Zancanaro, Paolo Busetta, Charles Callaway, Antonio Krüger, Michael Kruppa, Tsvi Kuflik, Elena Not et Cesare Rocchi (2007). “Adaptive, intelligent presentation of information for the museum visitor in PEACH”. In : *User Modeling and User-Adapted Interaction* 17.3, p. 257-304 (cf. p. 43, 49).

Vernon, David (2010). “Enaction as a conceptual framework for developmental cognitive robotics”. In : *Paladyn, Journal of Behavioral Robotics* 1.2, p. 89-98 (cf. p. 4).

Walter, Frank Edward, Stefano Battiston et Frank Schweitzer (2008). “A model of a trust-based recommendation system on a social network”. In : *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 16.1, p. 57-74 (cf. p. 29, 36).

Weick, Karl E (1995). *Sensemaking in organizations*. T. 3. Sage (cf. p. 52).

Wu, Zhibiao et Martha Palmer (1994). “Verbs semantics and lexical selection”. In : *Proceedings of the 32nd annual meeting on Association for Computational Linguistics*. Association for Computational Linguistics, p. 133-138 (cf. p. 81).

Yang, Bo, Tao Mei, Xian-Sheng Hua, Linjun Yang, Shi-Qiang Yang et Mingjing Li (2007). “Online video recommendation based on multimodal fusion and relevance feedback”. In : *Proceedings of the 6th ACM international conference on Image and video retrieval*. ACM, p. 73-80 (cf. p. 25, 36).

Yang, Jing, Matthew O Ward et Elke A Rundensteiner (2002). “Interring : An interactive tool for visually navigating and manipulating hierarchical structures”. In : *Information Visualization, 2002. INFOVIS 2002. IEEE Symposium on*. IEEE, p. 77-84 (cf. p. 17).

Yang, Yao Jung et Chuni Wu (2009). “An attribute-based ant colony system for adaptive learning object recommendation”. In : *Expert Systems with Applications* 36.2, p. 3034-3047 (cf. p. 28, 36, 67).

Zha, Zheng-Jun, Linjun Yang, Tao Mei, Meng Wang et Zengfu Wang (2009). “Visual query suggestion”. In : *Proceedings of the 17th ACM international conference on Multimedia*. ACM, p. 15-24 (cf. p. 26, 36).

Annexes

A

Recommandation de concepts

La figure A.1 illustre le fonctionnement du processus de recommandation de concepts. Deux types de signaux peuvent déclencher ce processus comme nous avons indiqué dans la section 3.5 : les signaux envoyés par l'utilisateur par l'intermédiaire de l'environnement et les signaux envoyés par le système lui même. Lorsque le moteur de recommandation reçoit l'un des deux signaux, il exécute les différentes fonctions suivantes de façon synchrone ou asynchrone :

— Récupérer les n derniers concepts identifiés dans la trace. L'idée est de faire part les concepts que l'utilisateur a récemment visités aux concepts à évaluer. Notons CV (ou « Concepts Visités ») l'ensemble formé par ces concepts.

— Définir le seuil d'évaluation (P_s). Ce seuil permet de décider si un concept peut être recommandé ou pas. Sa valeur dépend du type du signal reçu.

— Récupérer les concepts au niveau du dernier enregistrement de la trace. Nous considérons qu ces concepts sont les concepts que l'utilisateur est en train de consulter. Nous les notons CF (ou « Concepts Focaux »). Les évaluations des concepts se font alors par rapport à ces « Concepts Focaux ».

— Classer les concepts dans CV et dans CF par structure sémantique. Cela s'explique par le fait que les évaluations entre des concepts ne peuvent s'appliquer que lorsqu'ils sont dans une même structure sémantique. Dans ce cas, le système vérifie s'il y a un concept à recommander pour chaque structure sémantique.
La suite des procédures se fait alors par structure sémantique et seulement aux structures sémantiques identifiées au niveau du CF parce que nous cherchons les concepts les mieux évalués par rapport aux concepts focaux. Supposons que nous avons identifié k structures sémantiques au niveau du CF (avec $k \leq N$ où N est le nombre total des structures sémantiques à disposition, alors nous considérons pour

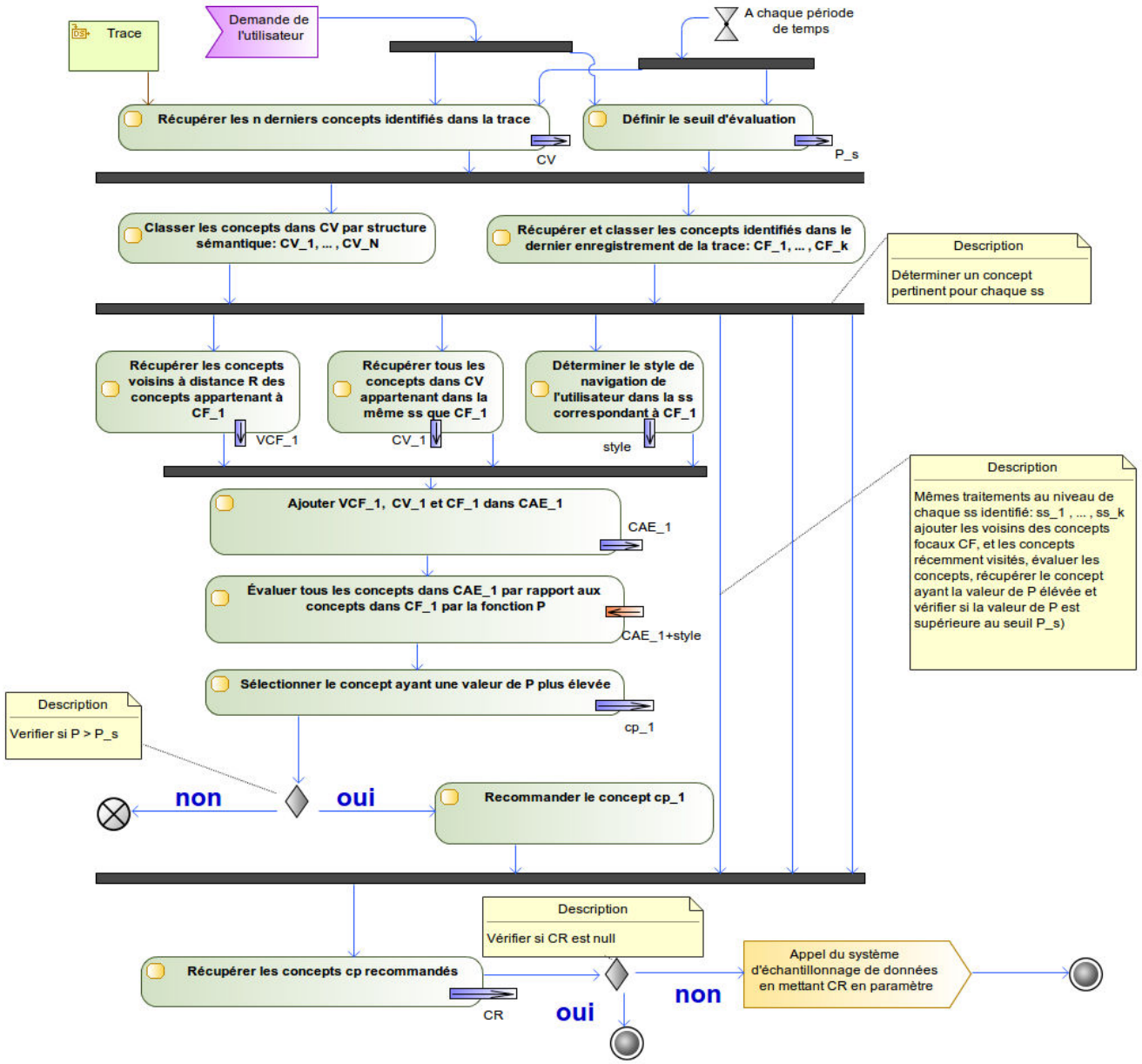


Figure A.1 – Processus de recommandation de concepts

CV : Concepts Visités	CF : Concepts Focaux
CAE : Concepts A Évaluer	CP : Concepts Pertinents
P : Pertinence	P_s : valeur seuil de P
ss : Structure Sémantique	CR : Concepts Recommandés
R : Rayon de voisinage	k : Catégories de ss identifiées ($k \leq N$)
$\rightarrow$: Données en sortie	$\leftarrow$: Données en entrée

la suite k structures sémantiques : $ss_1, ss_2, ..., ss_k$.

Pour chaque i tel que $1 \leq i \leq k$:

— Récupérer les concepts voisins à distance R des concepts appartenant à CF_i. La valeur du R permet de définir la taille de la zone de voisinage. Notons VCF_i («Voi-

sins des Concepts Focaux») l'ensemble des concepts voisins du CF_i.

— Récupérer tous les concepts dans CV appartenant dans la même structure sémantique que CF_i. Notons cet ensemble de concepts CV_i.

— Ajouter VCF_i , CV_i et CF_i dans CAE_i. Les concepts à évaluer sont alors formés par les « Concepts Focaux », les « Voisins des Concepts Focaux », et les « Concepts Visités ». Cette technique permet d'éviter d'évaluer tous les concepts dans toutes les structures sémantiques. Notons l'ensemble de ces concepts par CAE_i (ou « Concepts A Évaluer »).

— L'étape suivante est de déterminer le style de navigation de l'utilisateur dans la structure sémantique à laquelle appartient les concepts dans CF_i. Le style de navigation permet d'ajuster le poids que nous donnons aux paramètres d'évaluation de concepts.

— Évaluer tous les concepts dans CAE_i par rapport aux concepts dans CF_i par la fonction P définie au chapitre 3 (Formule 3.5.1).

— Sélectionner les concepts ayant une valeur P supérieur au seuil P_s. Notons CP_i l'ensemble des concepts pertinents dans CAE_i.

— L'étape finale est de former à partir des CP_i une combinaison de concepts qui n'appartient pas aux n dernières recommandations. Notons CR (ou « Concepts Recommandés ») la combinaison de concepts recommandés. Elle est formée par des concepts appartenant dans des structures sémantiques différentes. Une fois les concepts recommandés sont définis, ils sont envoyés au système d'échantillonnage de données pour obtenir des données qui les représentent.

B

Échantillonnage probabiliste

Quelques techniques d'échantillonnage probabiliste sont présentées ici telles que [1] : l'échantillonnage aléatoire, l'échantillonnage systématique, l'échnatillonnage stratifiée, l'échantillonnage en grappes et l'échantillonnage à plusieurs degrés.

— **Échantillonnage aléatoire simple**
Dans l'échantillonnage aléatoire simple, toutes les unités dans la population ont la même probabilité d'être incluses dans l'échantillon et toutes les combinaisons possibles ont la même probabilité d'être sélectionnées pour former l'échantillon.
Supposons que nous avons N unités dans une population Pop ($Pop = \{u_1, u_2, ..., u_N\}$), la probabilité de sélection d'une unité est définie par :
$P(u_1) = P(u_2) = ... = P(u_n) = 1/N$

— **Échantillonnage systématique**
L'échantillonnage systématique consiste à grouper les unités et que le nombre d'unités dans chaque groupe est approximativement égale à la taille d'échantillon. Supposons que nous avons N unités dans la population, elles sont numérotées de 1 à N et nous avons besoin de n entités dans l'échantillon. La population est divisée en k groupes tels que $k = N/n$. Pour former un groupe, il faut choisir aléatoirement une unité parmi les k premières dans la population. Ensuite, il faut sélectionner l'unité à la position écarté de k à celle qui a été sélectionnée précédemment, et le tirage continue de telle façon jusqu'à la formation des groupes. Quand les groupes sont formés, il faut choisir aléatoirement un pour former l'échantillon. Chaque unité a alors une chance de $1/k$ d'être sélectionnée dans l'échantillon. L'avantage de cette technique d'échantillonnage est qu'il est facile à mettre en œuvre tandis que son inconvénient est que le groupe sélectionné peut être non représentatif si les entités qu'il contient ont les mêmes caractéristiques.

1. https ://www.statcan.gc.ca/edu/power-pouvoir/ch13/nonprob/5214898-fra.htm, visité le 19 Février 2018

— **Échantillonnage stratifiée**
L'échantillonnage stratifiée consiste à diviser la population de façon homogène (appelés strates), et à sélectionner à partir de chaque strate des échantillons indépendants. La technique d'échantillonnage appliquée peut être différente d'une strate à une autre. Cette technique peut être plus efficace parce que si les unités dans chaque strate sont à peu prêt similaires et qu'elles présentent des caractéristiques considérablement différentes de celles contenues dans les autres strates, il suffit alors de sélectionner des unités dans chacune des strates pour avoir un échantillon représentatif. L'échantillonnage stratifié nous assure d'obtenir une taille d'échantillon suffisante pour des sous-groupes de la population à laquelle nous nous intéressons. La stratification est plus utiles lorsque les variables de stratification sont : simples à utiliser, faciles à observer et étroitement reliées au thème de l'enquête.

— **Échantillonnage en grappes**
L'échantillonnage stratifiée est efficace mais coûteux lorsqu'il y a un nombre important de strates parce qu'il demande la sélection d'unités de chaque strate. L'idée de l'échantillonnage en grappes est de réduire le coût. Dans ce cas, la population est divisée en grappes et ensuite, on sélectionne au hasard un certain nombre de grappes pour représenter la population totale, puis on englobe dans l'échantillon toutes les unités incluses à l'intérieur des grappes sélectionnées. En plus, de la réduction du coût, l'avantage de ce type d'échantillonnage est qu'on a d'échantillon plus concentré. Pourtant, l'un de ses inconvénients est que la taille d'échantillon ne peut pas être contrôlée. En plus, l'échantillon peut être non représentatif.

— **Échantillonnage à plusieurs degrés**
L'échantillonnage à plusieurs degrés est proche de l'échantillonnage en grappes. Son avantage est qu'il permet de contrôler la taille de l'échantillon parce qu'il y a un système de sélection au niveau de chaque grappe sélectionné au lieu d'inclure toutes les unités dans ces grappes. Ce type d'échantillonnage exige au moins deux degrés. Si par exemple, on applique la technique d'échantillonnage stratifiée aux deuxième degrés après l'échantillonnage en grappes, on l'appelle échantillonnage en « grappes stratifiées ».

Dans notre cas, nous avons utilisé la technique d'échantillonnage en « grappes stratifiées ». Nous appliquons d'abord la technique d'échantillonnage en grappes. L'idée est que si nous avons plusieurs centaines de catégories de données lorsqu'on les classe selon une dimension (spatiale, temporelle, ou thématique), nous sélectionnons seulement une certaine catégorie et de récupérer toutes les données dans ces catégories sélectionnées. Nous appliquons ensuite la technique d'échantillonnage stratifiée pour respecter la quantité demandée pour un échantillon. Pour cela, la répartition des données de l'échantillon selon les catégories sélectionnées est quasi-équitable.

C

Tests statistiques

Les tests statistiques consistent à prendre une décision sur l'acceptation ou le rejet d'une hypothèse grâce aux informations fournies par un échantillon. Notons H_0 (ou hypothèse nulle) l'hypothèse à tester et H_1 son alternative. H_0 et H_1 sont souvent complémentaires. Une fois H_0 définie, on peut évaluer la probabilité (p) d'obtenir les résultats observés si cette hypothèse était vraie (Riou et Landais 1998). Notons qu'il existe toujours des risques d'erreur de décision de rejet ou de maintien de l'hypothèse nulle. Deux risques sont possibles lorsqu'une décision est prise : le risque de première espèce noté α et le risque de seconde espèce noté β.

— La valeur de α désiré est définie a priori (les valeurs souvent utilisées sont : $\alpha = 0,05$ et $\alpha = 0,01$), et indique le taux de risque de rejeter H_0 alors qu'elle est vraie. Lorsque la probabilité p est plus grande que α, l'hypothèse nulle est acceptée, sinon, elle est rejetée (Elliott et Decamps 1973).

— La valeur de β s'ajuste automatiquement en fonction de la valeur de α et elle indique le taux de risque de ne pas rejeter H_0 alors que H_1 est vraie.

Parfois, il est intéressant de savoir si p est significativement petite ou non par rapport à la valeur de α comme par exemple, lorsqu'on mesure la différence de moyenne de deux échantillons. Ci-après un exemple de classement du niveau de signification selon la valeur de p :

— significative si $p < 0,05$
— hautement significative si $p < 0,01$
— très hautement significative si $p < 0,001$

Les tests statistiques peuvent être classés en deux catégories : les tests paramétriques et les tests non paramétriques (Preux et al. 2003).

— Les **tests paramétriques** sont fondés sur des hypothèses sur la loi de distribution de la variable étudiée. L'idée est de confirmer ou infirmer si la distribution observée

est conforme à la distribution théorique choisie ou si les fréquences observées sont égales aux probabilités théoriques. Ces tests ne peuvent pas être appliquées que si certaines conditions soient satisfaites, par exemple : la répartition de la population est homogène et suit la loi normale. Ci-après quelques exemple de tests paramétriques : test de l'écart normal réduit, test de conformité avec une loi de Poisson, test de χ^2, test de Fisher ou test de Student.

— Les **tests non paramétriques** peuvent être appliqués quand les conditions d'application de tests paramétriques ne sont pas satisfaites. Ils conviennent particulièrement aux petits échantillons de distributions contagieuses (dispersion en groupes). Ci-après quelques exemple de tests paramétriques : test Binomial, test de Wilcoxon, test des médianes, ou test de Welch.

Les tests paramétriques sont souvent puissants que tout autre pour rejeter l'hypothèse H_0 quand elle est fausse. Par contre, les tests non-paramétriques sont plus puissants si les conditions d'application de tests paramétriques ne sont pas satisfaites. Plusieurs tests non-paramétriques sont presque aussi efficaces que leurs équivalents paramétriques, même quand les conditions sont satisfaites.

Le choix du test dépend de l'objectif ou de l'hypothèse nulle (par exemple : comparaison des échantillons, corrélation entre des variables, test de conformité de distribution). Le site BiostaTGV [1] donne des indications sur le choix du test à appliquer selon le type d'hypothèse à tester.

1. http ://marne.u707.jussieu.fr/biostatgv/ ?module=tests, visité le 14 Février 2018

D

Traces d'interactions et de recommandations

Lors d'une expérimentation, deux fichiers de trace sont générés pour chaque utilisateur : un fichier contenant la liste d'interactions (trace d'interaction) et un autre contenant la liste de recommandations faites par le système (trace de recommandation).

D.1 Exemple d'une trace d'interaction

La trace d'interaction contient deux catégories d'informations : une en-tête spécifique à l'utilisateur (genre, année de naissance, département, familiarité avec les jeux vidéos et niveau d'intérêt pour patrimoine de Bretagne), et les informations sur ses interactions. Chaque élément de cette deuxième catégorie d'information est codé comme suit :

```
date heure;type d'interaction;dimension#concept;dimension#concept;...
```

Le paramètre `dimension` a trois valeurs possibles : $topos$ (dimension spatiale), $chronos$ (dimension temporelle), ou $thema$ (dimension thématique). Cela correspond aux trois catégories de structures sémantiques que nous avons présenté au chapitre 4 (voir section 4.1.1). Le paramètre `concept` est un mot clé lié à l'élément de l'environnement avec lequel l'utilisateur a interagit.

En considérant le cas du participant présenté ici, il a consulté un objet décrit par les mots clés suivants : façade, XVIIIe siècle, et Langolen. En général, un objet est décrit par trois mots clés (un pour chaque structure sémantique), mais il y a des cas où un objet est codé par deux ou plusieurs mots clés par structure sémantique. Le nombre d'éléments d'informations ajoutés après le type d'interaction dépend alors de la liste des mots clés de l'objet avec lequel l'utilisateur a interagit. Si le participant utilise un outil de navigation, il ne peut sélectionner qu'un seul concept sauf avec la frise chronologique pour laquelle,

il peut sélectionner une intervalle de temps. Les types d'interaction sont définis dans le chapitre 5 (voir section 4.1.4).

```
 Genre : Homme
Année de naissance : 1993
Département : 56
Familiarité aux jeux vidéo : 4
Niveau d'intérêt au patrimoine de Bretagne : 5
2017-09-16 12:32:57;TYPE_OBJECT_LOOK;thema#Façade;chronos#XVIIIe
siècle;topos#Langolen
2017-09-16 12:33:18;TYPE_OBJECT_LOOK;thema#Chapelle;chronos#XVIIe
siècle;topos#Saint-Goazec
2017-09-16 12:33:37;TYPE_OBJECT_LOOK;thema#Bassin;chronos#XIXe
siècle;topos#Saint-Goazec
...
2017-09-16 12:34:41;TYPE_TOOL_MARK;topos#Finistère
2017-09-16
12:36:53;TYPE_NAVIGATION_ENTER_ROOM;thema#Bassin;chronos#XIXe
siècle
2017-09-16 12:36:57;TYPE_OBJECT_LOOK;thema#Bassin;chronos#XVIIIe
siècle;topos#Quintin
2017-09-16
12:37:02;TYPE_OBJECT_VALIDATE;thema#Bassin;chronos#XVIIIe
siècle;topos#Quintin
...
2017-09-16 12:40:04;TYPE_TOOL_MARK;thema#Mentalités
2017-09-16 12:40:16;TYPE_TOOL_MARK;thema#Patrimoine religieux
2017-09-16 12:41:05;TYPE_NAVIGATION_ENTER_ROOM;thema#Patrimoine
religieux;topos#Morbihan;chronos#XIXe siècle
2017-09-16 12:41:12;TYPE_NAVIGATION_ENTER_ROOM;chronos#XXe siècle
...
```

D.2 Exemple d'une trace de recommandation

Chaque élément d'une trace de recommandation est codé comme suit :

`date heure;dimension#concept;dimension#concept;...`

Chaque ligne indique le moment auquel le système a recommandé une nouvelle salle. Les informations autre que la date et l'heure concernent les concepts décrivant la salle créée. Le nombre maximal de mots clés décrivant une salle est limité au nombre de structures sémantiques utilisées (un concept pertinent considéré par structure sémantique).

2017-09-16 12 :34 :16 ;thema#Bassin ;chronos#XIXe siècle
2017-09-16 12 :35 :15 ;chronos#XXe siècle
2017-09-16 12 :36 :16 ;thema#Sol ;chronos#XVIIe siècle
2017-09-16 12 :37 :16 ;topos#Quintin ;chronos#XVIIIe siècle
2017-09-16 12 :41 :00 ;thema#Patrimoine
religieux ;topos#Morbihan ;chronos#XIXe siècle

E

Publications

L'approche que nous avons proposé nous a permis de publier des articles scientifiques tant au niveau national qu'au niveau international.

- **au niveau national :**
  - **séminaires :**
    - L Rajaonarivo, M Courgeon, E Maisel, P De Loor, Musée virtuel co-évolutif : vers un système énactif pour l'exploration d'une base de données complexe, 2016, journée de l'Association Française de la Réalité virtuelle AFRV2016.

    - L Rajaonarivo, M Courgeon, P De Loor, E Maisel, Vers un système énactif pour l'exploration d'une base de données complexe : application au patrimoine, 2016, séminaire de l'équipe Interactions Humains Systèmes et Environnements Virtuels (Lab-STICC).

  - **école thématique** :
    - L Rajaonarivo, E Maisel, P De Loor, La marche pour chemin pour l'exploration de bases de données : application au patrimoine, école thématique "Rochebrune 2016" : rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels.

  - **groupe de travail** :
    - L Rajaonarivo, E Maisel, P De Loor, Animation adaptative pour l'exploration d'une base de données complexe : application au patrimoine, 2016, journée du Groupe de Travail Animation et Simulation GTAS 2016.

- **au niveau international :**
  - **conférences** :
    - L Rajaonarivo, M Courgeon, E Maisel, P De Loor, Inline Co-Evolution bet-

ween Users and Information Presentation for Data Exploration, p. 215–219, 2017, IUI '17, 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces, Limassol, Chyprus.

— L Rajaonarivo, E Maisel, P De Loor, An enactive based realtime 3D self-organization system for the exploration of a cultural heritage database, p. 100-105, IV2016, 20th International Conference of Information Visualization, Lisboa, Portugal.

— **workshop** :

— L Rajaonarivo, P De Loor, E Maisel, M Courgeon, Using the enaction paradigm as a basis for database exploration to favor users sensemaking, p. 224-227, 2017, CAOS2017, workshop on the cognition and ontologies organized by the Society for the Study of Artificial Intelligence and Simulation of Behaviour (AISB 2017), University of Bath, UK.

UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE / MATHSTIC

UBO Université de Bretagne Occidentale

Titre : Approche co-évolutive humain-système pour l'exploration de bases de données

Mots clés : Co-évolution, exploration de données, visualisation, recommandation, adaptabilité, environnement 3D, métaphores.

Résumé : Ces travaux de recherche portent sur l'aide à l'exploration de bases de données. La particularité de l'approche proposée repose sur un principe de co-évolution de l'utilisateur et d'une interface intelligente. Cette dernière devant permettre d'apporter une aide à la compréhension du domaine représenté par les données. Pour cela, une métaphore de musée virtuel vivant a été adoptée. Ce musée évolue de façon incrémentale au fil des interactions de l'utilisateur. Il incarne non seulement les données mais également des informations sémantiques explicitées par un modèle de connaissances spécifique au domaine exploré. A travers l'organisation topologique et l'évolution incrémentale, le musée personnalise en ligne le parcours de l'utilisateur. L'approche est assurée par trois mécanismes principaux : l'évaluation du profil de l'utilisateur modélisé par une pondération dynamique d'informations sémantiques, l'utilisation de ce profil dynamique pour établir une recommandation ainsi que l'incarnation des données dans le musée.

L'approche est appliquée au domaine du patrimoine dans le cadre du projet ANTIMOINE, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). La généricité de cette dernière a été démontrée à travers son application à une base de données de publications mais également à travers l'utilisation de types d'interfaces variés (site web, réalité virtuelle).
Des expérimentations ont permis de valider l'hypothèse que notre système s'adapte aux évolutions des comportements de l'utilisateur et qu'il est capable, en retour, d'influencer ce dernier. Elles ont également permis de comparer une interface 2D avec une interface 3D en termes de qualité de perception, de guidage, de préférence et d'efficacité.

Title : Human-system co-evolutive approach for database exploration

Keywords : co-evolution, data exploration, visualization, recommendation, adaptability, 3D environment, metaphors

Abstract: This thesis focus on a proposition that helps humans during the exploration of database. The particularity of this proposition relies on a co-evolution principle between the user and an intelligent interface. It provides a support to the understanding of the domain represented by the data. A metaphor of living virtual museum is adopted. This museum evolves incrementally according to the user's interactions. It incarnates both the data and the semantic information which are expressed by a knowledge model specific to the domain of the data. Through the topological organization and the incremental evolution, the museum personalizes online the user's exploration

The approach is insured by three main mechanisms: the evaluation of the user profile modelled by a dynamical weighting of the semantic information, the use of this dynamic profile to establish a recommendation as well as the incarnation of the data in the living museum. The approach has been applied to the heritage domain as part of the ANTIMOINE project, funded by the National Research Agency (ANR). The genericity of the latter has been demonstrated through its application to a database of publications but also using various types of interfaces (website, virtual reality). Experiments have validated the hypothesis that our system adapts itself to the user behavior and that it is able, in turn, to influence him. They also showed the comparison between a 2D interface and a 3D interface in terms of quality of perception, guidance, preference and efficiency.