



**HAL**  
open science

# Proposition de modes de visualisation et d'interaction innovants pour les grandes masses de données et/ou les données structurées complexes en prenant en compte les limitations perceptives des utilisateurs

Alma Cantu

## ► To cite this version:

Alma Cantu. Proposition de modes de visualisation et d'interaction innovants pour les grandes masses de données et/ou les données structurées complexes en prenant en compte les limitations perceptives des utilisateurs. Interface homme-machine [cs.HC]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique, 2018. Français. NNT : 2018IMTA0068 . tel-01880977

**HAL Id: tel-01880977**

**<https://theses.hal.science/tel-01880977v1>**

Submitted on 25 Sep 2018

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

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

# THESE DE DOCTORAT DE

L'ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE MINES-TELECOM  
ATLANTIQUE BRETAGNE PAYS DE LA LOIRE - IMT ATLANTIQUE  
COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ÉCOLE DOCTORALE N° 601  
*Mathématiques et Sciences et Technologies  
de l'Information et de la Communication*

Spécialité : Informatique

Par

**Alma CANTU**

**« Proposition de modes de visualisation et d'interaction innovants pour les grandes masses de données et/ou les données structurées complexes en prenant en compte les limitations perceptives des utilisateurs »**

Thèse présentée et soutenue à Brest, le 15 février 2018

Unité de recherche : Labsticc

Thèse N : 2018IMTA0068

## Composition du Jury :

Président :	Jean-Daniel FEKETE	Directeur de recherche, Inria - Saclay
Rapporteurs :	Christophe HURTER Gilles VENTURINI	Professeur, Ecole Nationale d'Aviation Civile - Toulouse Professeur, Université François Rabelais
Examineurs	Maud MARCHAL Olivier GRISVARD Gilles COPPIN	Maître de conférences (HDR), Insa - Rennes Ingénieur de recherche, Thales Systèmes Aéroportés – Brest Professeur, IMT Atlantique
Dir. de thèse :	Thierry DUVAL	Professeur, IMT Atlantique



# *Abstract*

As a result of the improvement of data capture and storage, recent years have seen the amount of data to be processed increase dramatically. Many studies, ranging from automatic processing to information visualization, have been performed, but some areas are still too specific to take advantage of. This is the case of ELeCtromagnetic INTelligence (ELINT). This domain does not only deal with a huge amount of data but also has to handle complex data and usage as well as populations of users with less and less experience.

In this thesis we focus on the use of existing and new technologies applied to visualization to propose solutions to the combination of issues such as huge amount and complex data. We begin by presenting an analysis of the ELINT field which made it possible to extract the issues that it must faces. Then, we focus on the visual solutions handling the combinations of such issues but the existing work do not contain directly such solutions. Therefore, we focus on the description of visual issues and propose a characterization of these issues. This characterization allows us to describe the existing representations and to build a recommendation tool based on how the existing work solves the issues. Finally, we focus on identifying new metaphors to complete the existing work and propose an immersive representation to solve the issues of ELINT. These contributions make it possible to analyze and use the existing and deepen the use of immersive representations for the visualization of information.

# *Résumé*

Suite à l'amélioration des outils de capture et de stockage des données, ces dernières années ont vu les quantités de données à traiter croître énormément. De nombreux travaux, allant du traitement automatique à la visualisation d'information, ont alors été mis en place, mais certains domaines sont encore trop spécifiques pour en profiter. C'est le cas du Renseignement d'Origine ÉlectroMagnétique (ROEM). Ce domaine ne fait pas uniquement face à de grandes quantités de données mais doit aussi gérer des données et des usages complexes ainsi que des populations d'utilisateurs ayant de moins en moins d'expérience.

Dans cette thèse nous nous sommes intéressé à l'usage de l'existant et des nouvelles technologies appliquées à la visualisation pour proposer des solutions à la combinaison de problématiques comme les données en grandes quantité et les données complexes. Nous commençons par présenter une analyse du domaine du ROEM qui a permis d'extraire les problématiques auxquelles il doit faire face. Nous nous intéressons ensuite aux solutions gérant les combinaisons de telles problématiques. L'existant ne contenant pas directement de telles solutions, nous nous intéressons alors à la description des problématiques de visualisation et proposons une caractérisation de ces problématiques. Cette caractérisation nous permet de décrire les représentations existantes et de mettre en place un outil de recommandation des représentations basé sur la façon dont l'existant résout les problématiques. Enfin nous nous intéressons à identifier de nouvelles métaphores pour compléter l'existant et proposons une représentation immersive permettant de résoudre les problématiques du ROEM. Ces contributions permettent d'analyser et d'utiliser l'existant et approfondissent l'usage des représentations immersives pour la visualisation d'information.

## *Remerciements*

Je tiens à remercier tous les gens qui m'ont permis de réaliser ces travaux et donc en premier lieu Thierry Duval, mon directeur de thèse, et Olivier Grisvard, mon encadrant, pour leur implication, leurs conseils avisés et leur bienveillance. Je remercie également Gilles Coppin, pour son implication plus distante mais tout autant bénéfique.

Je remercie Christophe Hurter, Gilles Venturini, Jean-Daniel Fekete et Maud Marchal pour avoir pris le temps de critiquer et remettre en question mes travaux aux travers de rapports ou de discussions.

Je remercie particulièrement les différentes personnes impliquées dans le renseignement d'origine électromagnétique, qu'ils soient civils ou militaires, pour m'avoir partagé leurs savoirs et m'avoir fournis les outils m'ayant permis d'approfondir ma connaissance du domaine.

Je tiens aussi à remercier tout mon entourage professionnel, que ce soit mes collègues de IMT Atlantique, les membres de mon équipe de recherche (IHSEV) ou mes collègues de Thales Systèmes Aéroportés, pour m'avoir permis d'évoluer dans un environnement convivial et enrichissant.

Enfin je tiens à remercier mes amis, dont certains ont déjà été cités, et surtout ma famille pour avoir été là, tout simplement.



# Table des matières

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Résumé</b>	<b>iv</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>xi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>xv</b>
<b>Liste des codes sources</b>	<b>xvii</b>
<b>Abbreviations</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Le Renseignement d’Origine ÉlectroMagnétique (ROEM)</b>	<b>5</b>
2.1 Description . . . . .	5
2.1.1 Origine . . . . .	5
2.1.2 Besoins . . . . .	6
2.1.3 Données . . . . .	7
2.1.4 Contexte d’usage . . . . .	8
2.1.5 Synthèse . . . . .	8
2.2 Problématiques . . . . .	9
2.2.1 Grande quantité de données . . . . .	9
2.2.2 Données complexes . . . . .	9
2.2.3 Utilisateurs non-experts . . . . .	10
2.2.4 Écoutes multiples . . . . .	11
2.2.5 Variation complexe des données . . . . .	11
2.2.6 Données erronées . . . . .	13
2.2.7 Bruit . . . . .	13
2.2.8 Données manquantes . . . . .	14
2.2.9 Données dupliquées . . . . .	14
2.2.10 Synthèse . . . . .	15
2.3 Conclusion . . . . .	15

<b>3</b>	<b>État de l'art</b>	<b>17</b>
3.1	Gestion de la quantité de données . . . . .	17
3.1.1	Représentations synthétiques et détaillées . . . . .	18
3.1.2	Représentations condensées . . . . .	20
3.1.3	Représentations étendues . . . . .	21
3.2	Gestion des données multidimensionnelles . . . . .	22
3.2.1	Encodages visuels multiples . . . . .	22
3.2.2	Multi-vue et liaisons . . . . .	23
3.3	Autres . . . . .	25
3.3.1	Animations . . . . .	25
3.3.2	Représentations écologiques . . . . .	26
3.4	Conclusion . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Caractérisation des problématiques de représentation</b>	<b>29</b>
4.1	Identification des catégories de problématiques . . . . .	29
4.1.1	Définitions du processus de visualisation . . . . .	30
4.1.2	Proposition d'une définition synthétique . . . . .	32
4.1.3	Confrontation aux études empiriques . . . . .	35
4.1.4	Synthèse . . . . .	35
4.2	Catégorie : Type de données . . . . .	36
4.2.1	Volume des données . . . . .	36
4.2.2	Organisation des données . . . . .	38
4.2.3	Propriétés des attributs . . . . .	39
4.2.4	Nature des attributs . . . . .	40
4.2.5	Temporalité des données . . . . .	40
4.2.6	Dimension des données . . . . .	41
4.2.7	Synthèse . . . . .	42
4.3	Catégorie : Besoins de l'utilisateur . . . . .	43
4.3.1	Attentes vis-à-vis des taxonomies des tâches . . . . .	43
4.3.2	Construction d'une taxonomie à partir de l'existant . . . . .	44
4.3.3	Présentation d'une taxonomie synthétique . . . . .	47
4.3.4	Synthèse . . . . .	49
4.4	Catégorie : Contexte d'usage . . . . .	50
4.4.1	Plateforme . . . . .	50
4.4.2	Environnement . . . . .	51
4.4.3	Expérience de l'utilisateur . . . . .	52
4.4.4	Synthèse . . . . .	53
4.5	Conclusion . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Recommandation de conception</b>	<b>55</b>
5.1	Identification des composants . . . . .	56
5.1.1	Transformations des données . . . . .	56
5.1.2	Mappings visuel . . . . .	57
5.1.3	Transformations de la vue . . . . .	58
5.1.4	Interactions . . . . .	61
5.1.5	Synthèse . . . . .	62
5.2	Extraction des relations . . . . .	63

5.2.1	Description des problématiques . . . . .	63
5.2.2	Description des composants . . . . .	64
5.2.3	Mise en relation . . . . .	65
5.2.4	Synthèse . . . . .	66
5.3	Création d'un outil de recommandation . . . . .	66
5.4	Apport et validation de l'outil de recommandation . . . . .	68
5.4.1	TimeTower . . . . .	69
5.4.2	PulseTrain . . . . .	71
5.4.3	Parallel coordinates . . . . .	73
5.4.4	Discussion . . . . .	75
5.4.5	Synthèse . . . . .	75
5.5	Conclusion . . . . .	75
<b>6</b>	<b>HeloVis : un outil de visualisation immersif pour le ROEM</b>	<b>77</b>
6.1	Description . . . . .	77
6.1.1	Contexte . . . . .	77
6.1.2	Description du principe . . . . .	78
6.1.3	Travaux existants . . . . .	81
6.1.4	La visualisation 3D . . . . .	82
6.1.5	Utilisation de notre outil de recommandation . . . . .	83
6.1.6	Dispositif utilisé . . . . .	84
6.1.7	Fonctionnalités et interactions . . . . .	84
6.1.8	Implémentation . . . . .	90
6.1.9	Usage . . . . .	91
6.1.10	Synthèse . . . . .	92
6.2	Évaluation . . . . .	92
6.2.1	Cadre expérimental . . . . .	93
6.2.1.1	Procédure . . . . .	93
6.2.1.2	Tâche de détection d'impulsions appartenant à un même signal . . . . .	94
6.2.1.3	Dispositifs utilisés . . . . .	95
6.2.1.4	Participants . . . . .	95
6.2.1.5	Données . . . . .	95
6.2.1.6	Synthèse . . . . .	97
6.2.2	Résultats . . . . .	97
6.2.2.1	Prétraitement . . . . .	97
6.2.2.2	Quantité de détection . . . . .	97
6.2.2.3	Qualité de détection . . . . .	98
6.2.2.4	Seuil de qualité . . . . .	99
6.2.2.5	Impact de la complexité du signal . . . . .	100
6.2.2.6	Impact de l'expertise utilisateur . . . . .	101
6.2.2.7	Impact de l'ordre d'évaluation des systèmes . . . . .	102
6.2.2.8	Stratégies observées . . . . .	102
6.2.2.9	Résultats subjectifs . . . . .	104
6.2.2.10	Synthèse . . . . .	104
6.2.3	Discussion . . . . .	105
6.3	Conclusion . . . . .	105

<b>7 Conclusion et perspectives</b>	<b>107</b>
7.1 Conclusion . . . . .	107
7.2 Perspectives techniques . . . . .	109
7.3 Perspectives scientifiques . . . . .	109
<b>A Code recommandation</b>	<b>111</b>
<b>B Architecture HeloVis</b>	<b>113</b>
<b>Contributions</b>	<b>115</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>119</b>

# Table des figures

2.1	Usage du radar de manière active pour la détection d'un avion par un bateau et usage du radar de manière passive pour l'identification du bateau par l'avion . . . . .	6
2.2	Caractéristiques d'un signal radar émis . . . . .	7
2.3	Caractéristiques d'un signal radar intercepté . . . . .	8
2.4	Valeurs de DTOA sur des données contenant plusieurs signaux radar . . .	11
2.5	Variation ondulatoire du niveau . . . . .	12
2.6	Variation du niveau par palier . . . . .	12
2.7	Variation pseudo-aléatoire de la fréquence . . . . .	12
2.8	Long motif en DI et PRI (six impulsions) . . . . .	13
2.9	Variation de la PRM par palier . . . . .	13
2.10	Mesure de la DTOA sur des données ayant des impulsions manquantes . .	14
2.11	Données avant et après interception par un capteur, illustrant une duplication . . . . .	15
3.1	Usage d'une vue synthétique pour représenter les flux migratoires au sein des États-Unis d'Amérique . . . . .	18
3.2	Usage combiné d'une vue synthétique et d'une vue détaillée pour représenter la consommation de gaz naturel au cours du temps . . . . .	19
3.3	Usage d'une représentation condensée pour analyser des logs réseau . . . .	20
3.4	Usage d'un mur d'écran pour représenter des données en grande quantité .	21
3.5	Usage d'un casque de réalité virtuelle pour explorer des données complexes et en grande quantité . . . . .	21
3.6	Usage d'un environnement virtuel pour représenter des données complexes	23
3.7	Usage de la multi-vue pour représenter des données multidimensionnelles .	24
3.8	Usage de la multi-vue avec liaison (couleur et connexions) pour représenter des données multidimensionnelles . . . . .	25
3.9	Usage de l'animation pour faire le lien entre les localisations de trajets aériens et leur altitude . . . . .	26
3.10	Usage d'une représentation écologique pour différencier des données mesurées et des données estimées . . . . .	27
4.1	Processus de visualisation décrivant le flux d'information de Chen et Jänicke	30
4.2	Processus de visualisation prenant en compte l'interaction de van Wijk . .	31
4.3	Processus de visualisation issu d'un analyse formelle de Vickers et al. . . .	31
4.4	Première version du processus de visualisation synthétique permettant d'identifier trois types de facteurs influençant la visualisation . . . . .	32

4.5	Détail du processus de visualisation de la réalité à la donnée représentée (a) initial, (b) après la prise en compte de la transformation de traitement et (c) après la synthèse des transformations de capture et de traitement . . . . .	33
4.6	Processus de visualisation synthétique prenant en compte l'interaction et permettant d'identifier trois facteurs qui influencent la visualisation . . . . .	34
4.7	Illustration de l'usage du zoom pour améliorer l'interprétation . . . . .	34
4.8	Illustration de l'usage de l'interaction pour insérer une impulsion dans le signal . . . . .	34
4.9	Facteurs influençant la visualisation d'après Pfitzner et al. . . . .	35
4.10	Comparaison entre les facteurs de Pfitzner et al. et notre proposition validant sa conformité à l'existant . . . . .	36
4.11	Icônes représentant les trois types de volume de données : petit volume, volume moyen et gros volume . . . . .	38
4.12	Icônes représentant les différents types d'organisations des données : non structurées, structurées de manière non orientée et structurées de manière orientée . . . . .	39
4.13	Icônes représentant les différents types de propriétés des attributs : nominale, ordinale et quantitative . . . . .	39
4.14	Icônes représentant les différents types de natures des attributs : caractéristique et référentielle . . . . .	40
4.15	Icônes représentant les différents types de dimensions des attributs : unidimensionnel, bidimensionnel, tridimensionnel et multidimensionnel . . . . .	42
4.16	Problématiques de représentation du ROEM liées au type de données identifiées à l'aide de notre caractérisation . . . . .	42
4.17	Première étape de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes . . . . .	45
4.18	Deuxième étape de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes . . . . .	46
4.19	Troisième étape de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes . . . . .	46
4.20	Étape finale de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes . . . . .	47
4.21	Représentation permettant la tâche d'identification de valeur en proposant l'accès à la valeur d'une donnée par un survol de la souris . . . . .	47
4.22	Représentation permettant la tâche d'accès aux informations en identifiant les données dont les valeurs sont comprises entre 2 et 3 . . . . .	47
4.23	Représentation illustrant la tâche de tri en permettant d'identifier que l'avant-dernière donnée à droite a une valeur supérieure à celle des autres données . . . . .	48
4.24	Représentation illustrant la tâche de comparaison en permettant d'identifier que la donnée sur la droite a une valeur un tiers plus importante que la donnée à gauche . . . . .	48
4.25	Représentation illustrant la tâche d'identification d'une distribution en permettant d'identifier que les données sont distribuées autour de deux valeurs . . . . .	48
4.26	Représentation illustrant la tâche de distinction en permettant de distinguer le quatrième carré via un encodage des valeurs en couleur . . . . .	48

4.27	Représentation illustrant la tâche d'association en permettant d'associer des données en deux groupes . . . . .	49
4.28	Représentation illustrant la tâche de corrélation en permettant d'identifier qu'il existe une corrélation entre la valeur encodant la couleur et celle qui encodant la forme, car tous les carrés sont d'une même couleur et tous les disques sont d'une autre couleur . . . . .	49
4.29	Représentation illustrant la tâche de création d'information en permettant de créer un groupe de données . . . . .	49
4.30	Icônes représentant les différents types de plateformes : petit dispositif, dispositif standard, mur d'écrans et dispositif immersif . . . . .	51
4.31	Icônes représentant les différents types d'expertises des utilisateurs influençant la représentation : compétences (S), règles (R) et connaissances (K) . . . . .	52
4.32	Synthèse des caractéristiques des problématiques de représentation illustrant leurs relations arborescentes . . . . .	54
5.1	Usage de variables visuelles de couleur (x2), de position et de taille pour représenter des données climatiques en fonction d'au moins quatre de leurs attributs . . . . .	58
5.2	Usage de variables visuelles de liaisons pour représenter des logs réseau . . . . .	59
5.3	Usage de variables visuelles sémantiques de formes et de taille pour représenter la valeur des différentes races de chien . . . . .	60
5.4	Usage d' <i>Overview+detail</i> pour représenter des connexions du cerveau . . . . .	60
5.5	Usage de la séparation spatiale des attributs pour représenter différents attributs de données bancaires . . . . .	61
5.6	Usage de la séparation spatiale des données sur des trajectoires d'avions . . . . .	61
5.7	Image de la représentation GapMinder . . . . .	63
5.8	Illustration des problématiques que résout GapMinder . . . . .	64
5.9	Problématiques et composants de GapMinder mis en relations . . . . .	65
5.10	Problématique associée à la représentation TimeTower . . . . .	69
5.11	Image de la représentation TimeTower . . . . .	71
5.12	Problématique associée à la représentation PulseTrain . . . . .	72
5.13	Image de la représentation PulseTrain . . . . .	73
5.14	Problématique associée à un <i>parallel coordinates</i> pour le ROEM . . . . .	73
5.15	Image d'un <i>parallel coordinates</i> pour le ROEM . . . . .	74
6.1	Illustrations des biais induits par (a) des données erronées, (b) un mélange de données, (c) des données manquantes et (d) des variations complexes sur l'association des impulsions selon le signal radar qui les a émises . . . . .	78
6.2	Un objet (cube) représenté sur une hélicoïde et décrit par sa position dans un repère cylindrique . . . . .	79
6.3	Différentes représentations d'un signal ayant une PRM constante. Pour une période d'enroulement égale à la PRM du signal on distingue une pile d'impulsions sur la représentation hélicoïdale. . . . .	79
6.4	Différentes représentations de deux différents signaux . . . . .	80
6.5	Différentes représentations d'un signal dont le motif contient plusieurs impulsions . . . . .	80
6.6	Différentes représentations d'un signal ayant une impulsion manquante . . . . .	80
6.7	Différentes représentations d'un signal . . . . .	81

6.8	Représentation d'un signal en fonction d'un diviseur de sa PRM . . . . .	81
6.9	Schéma représentant les actionneurs des manettes de l'HTC Vive utilisées pour HeloVis . . . . .	85
6.10	Alignements observables sur HeloVis indiquant la présence d'un signal radar	86
6.11	Panneau permettant la modification indirecte de la période d'enroulement	86
6.12	Panneau permettant la modification des paramètres d'affichage . . . . .	87
6.13	Vue illustrant l'encodage de la fréquence en profondeur de rayon . . . . .	87
6.14	Vue illustrant l'encodage du niveau en profondeur de rayon . . . . .	87
6.15	Exemple d'accès aux valeurs d'une impulsion . . . . .	88
6.16	Exemple de mesure de la différence de temps entre deux impulsions . . . . .	88
6.17	Exemple de sélection d'un groupe d'impulsions . . . . .	89
6.18	Vue d'un groupe de données déplacées après une sélection . . . . .	89
6.19	Menu contenant les panneaux d'encodage des données (en haut à gauche) et de modification de la période (en haut à gauche) et les boutons du mode observation (en bas à gauche), du mode sélection (en bas au centre) et du mode archivage (en bas à droite) . . . . .	91
6.20	Exemple de données envoyées dans une vue secondaire nécessitant d'être nettoyées . . . . .	92
6.21	Illustration de l'outil de référence contenant trois graphiques 2D encodant respectivement en fonction du temps la DI, la DTOA et la fréquence . . . . .	94
6.22	Pourcentage de sélection et de bruit sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) . . . . .	99
6.23	Pourcentage de bruit et de sélection sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) après avoir filtré les données selon un seuil sur la quantité de bruit . . . . .	100
6.24	Pourcentage de bruit et de sélection en fonction de la complexité du signal sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) . . . . .	101
6.25	Pourcentage de bruit et de sélection en fonction de la similarité des signaux sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) . . . . .	101
6.26	Pourcentage de bruit et de sélection en fonction de l'expertise utilisateur sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) . . . . .	101
6.27	Pourcentage de bruit et de sélection sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) en fonction de l'ordre dans lequel les participants les ont utilisés	102
6.28	Illustration de l'outil de référence dont les valeurs de DTOA semblent être impactées par des données manquantes . . . . .	103
6.29	Représentation hélicoïdale dont la période a été volontairement associée à une valeur différente de la PRM pour identifier les impulsions externes au signal analysé . . . . .	104
B.1	Machine à état régissant le système HeloVis. Les couleurs correspondent aux couleurs associées aux différents modes de HeloVis. . . . .	113

# Liste des tableaux

2.1	Exemple de contenu d'un fichier du ROEM . . . . .	8
3.1	Synthèse des problématiques que résolvent les représentations analysées (● : permet ; ● : ne permet pas ; + : facilite ; - : ne facilite pas) . . . . .	28
4.1	Volumes de données maximaux perceptibles selon différents dispositifs . .	37
6.1	Complexité et similarité des signaux radars utilisés pour l'évaluation d'après un expert du ROEM . . . . .	96
6.2	Nombre de détections total, par participant et par signal sur HeloVis et sur l'outil de référence . . . . .	98
6.3	Résultat du test de Wilcoxon sur le pourcentage de bruit et de sélection sur HeloVis et l'outil de référence . . . . .	99
6.4	Valeurs de sélection et de bruit moyen en considérant des seuils de qualité définis par un pourcentage de bruit maximum, sur HeloVis et sur l'outil de référence . . . . .	100
6.5	Différence de pourcentage de sélection et de bruit entre HeloVis et l'outil de référence par participants . . . . .	102



# Liste des codes sources

5.1	Exemple de description de problématique à résoudre . . . . .	66
5.2	Exemple de description de relations . . . . .	67
5.3	Exemple de description de requête et de réponse de l'outil de recommandation . . . . .	68
5.4	Description de la problématique associée à la représentation TimeTower en Prolog . . . . .	69
5.5	Retour de l'outil de recommandation pour la problématique de TimeTower	70
5.6	Retour de l'outil de recommandation pour la problématique de PulseTrain	72
5.7	Retour de l'outil de recommandation pour la problématique de <i>parallel coordinates</i> pour le ROEM . . . . .	74
6.1	Usage de l'outil de recommandation pour la conception d'HeloVis . . . . .	84
A.1	Fonctions principales de l'outil de recommandation de conception. Le principe est d'associer tous les composants permettant de résoudre une problématique donnée en fonction de relations entre problématiques et composants issues de l'existant (les relations ne sont pas décrites ici). . . . .	111



# Abbreviations

<b>ATOL</b>	<b>A</b> eronautics <b>T</b> echnico- <b>O</b> perational <b>L</b> aboratory
<b>DI</b>	<b>D</b> urée d' <b>I</b> mpulsions
<b>DOA</b>	<b>D</b> irection <b>O</b> f <b>A</b> rrival
<b>DTOA</b>	<b>D</b> elta of <b>T</b> O <b>A</b>
<b>ELINT</b>	<b>E</b> lectronic <b>I</b> NTelligence
<b>GE</b>	<b>G</b> uerre <b>É</b> lectronique
<b>IHM</b>	<b>I</b> nteraction <b>H</b> omme <b>M</b> achine
<b>IHSEV</b>	<b>I</b> nteractions <b>H</b> umains <b>S</b> ystèmes et <b>E</b> nvironnements <b>V</b> irtuels
<b>LUSI</b>	<b>L</b> ogique des <b>U</b> sages, <b>S</b> ciences <b>S</b> ociales et de l' <b>I</b> nformation
<b>PRI</b>	<b>P</b> ériode de <b>R</b> épétition d' <b>I</b> mpulsions
<b>PRM</b>	<b>P</b> ériode de <b>R</b> épétition du <b>M</b> otif
<b>ROEM</b>	<b>R</b> enseignement d' <b>O</b> rigine <b>É</b> lectro <b>M</b> agnétique
<b>TOA</b>	<b>T</b> ime <b>O</b> f <b>A</b> rrival



# Chapitre 1

## Introduction

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein du laboratoire ATOL (Aeronautics Technico-Operational Laboratory) qui est un laboratoire codirigé par l'École navale, IMT Atlantique, Thales Systèmes Aéroportés et Thales Underwater Systems et qui s'intéresse aux problématiques d'interaction homme-machine dans les systèmes aéroportés ou sous-marin. Ces travaux ont fait l'objet d'une thèse Cifre dont le déroulement s'est passé à temps égal entre l'entreprise Thales Systèmes Aéroportés et IMT Atlantique. Vis-à-vis de Thales Systèmes Aéroportés, ces travaux ont été faits au sein de l'équipe IHM (Interaction Homme Machine) d'Olivier Grisvard, qui dépend de la branche logiciel de Thales Systèmes Aéroportés. Vis-à-vis de IMT Atlantique, les travaux se sont déroulés sur le campus de Brest, au sein du département LUSI (Logique des Usages, Sciences Sociales et de l'Information), sous la tutelle scientifique du Lab-STICC (UMR CNRS 6285), pôle CID, équipe IHSEV (Interactions Humaines Systèmes et Environnements Virtuels).

Cette thèse se situe dans le cadre de travaux de recherche sur la visualisation d'information. Dans un contexte plus général d'interaction humain-machine on distingue deux types d'interactions : de l'humain vers la machine et de la machine vers l'humain. Bien que ces deux types d'interactions soient intrinsèquement liés, nous nous intéressons principalement à la visualisation d'information (interaction de la machine vers l'humain) ainsi qu'à toutes les problématiques connexes que sont la perception cognitive, le design graphique, l'ergonomie et la synthèse d'image.

Une représentation graphique ou visualisation de données est un encodage visuel d'un ensemble d'informations. Les représentations exploitent les capacités de perception visuelle de l'humain pour promouvoir les informations qu'elles encodent. Plus la quantité et la complexité des données sont importantes plus la capacité perceptive sera sollicitée [56]. Or, le domaine de la visualisation d'information, comme beaucoup de domaines liés à l'informatique, a été énormément impacté par l'amélioration des outils d'acquisition

et de stockage des données. Ces changements ont transformé les échelles de quantité de données et ont nécessité une adaptation des méthodes de gestion de la perception visuelle. Ces adaptations étant souvent spécifiques aux cas d'application, il reste encore des domaines où l'impact de la quantité de donnée sur la perception visuelle n'a pas été géré, notamment dans les domaines faisant face à plusieurs problématiques combinées.

Le domaine du ROEM (Renseignement d'Origine ÉlectroMagnétique), qui est d'intérêt pour Thales Systèmes Aéroportés, est particulièrement confronté à la combinaison de problématiques de visualisation. Le ROEM a pour objectif de caractériser des signatures de signaux radars. Il est pour cela contraint par des données en quantité mais aussi par des données complexes et par des tâches complexes et fait face à des contraintes sur l'expertise des utilisateurs. Il doit donc pouvoir gérer de manière combinée des problématiques majeures de la visualisation ce qui en fait un cas d'application pertinent dont les solutions intéressent Thales Système Aéroportés.

Aujourd'hui le domaine de la visualisation d'information est confronté à l'usage de nouveaux outils : les environnements immersifs et augmentés. Face à ces outils, nouveaux pour le domaine, il est légitime de se demander s'ils n'apportent pas de solutions à la gestion de problématiques combinées comme la grande quantité et la complexité des données. Afin d'apporter un élément de réponse à cette question, nous nous sommes intéressés à y répondre à l'aide du cas d'application du ROEM. Ceci nous amène à la problématique initiale de cette thèse qui est la proposition de modes de visualisation et d'interaction innovants pour les grandes quantités de données et les données complexes, en prenant en compte les limitations perceptives des utilisateurs, à l'aide du cas d'application du ROEM.

Dans le chapitre 2 nous décrivons le domaine du ROEM pour identifier les problématiques de visualisation d'information auquel il est confronté. Nous définissons ainsi un ensemble de problématiques combinées que nous utiliserons pour valider nos propositions et dont les solutions seront applicables au ROEM. Dans un premier temps, nous nous intéressons, chapitre 3, aux techniques de visualisation existantes y répondant. Nous constatons que les outils existants, s'ils ne permettent pas de résoudre les problématiques identifiées, apportent des solutions partielles. Nous cherchons donc à comprendre ce qui permet ces solutions partielles pour initier la construction de solutions. Pour ce faire, nous commençons par chercher un moyen d'identifier clairement l'apport de chaque visualisation. Nous définissons ainsi, chapitre 4, une caractérisation des problématiques de visualisation. En caractérisant un grand nombre de techniques de visualisation, nous identifions des relations entre les problématiques de visualisation et les composants des techniques. Chapitre 5, nous utilisons ces relations pour construire un outil de recommandation de visualisation que nous testons sur des cas d'application du ROEM. Ayant extrait un

certain nombre de composants permettant de résoudre partiellement nos problématiques combinées, nous nous intéressons, chapitre 6, à l'utilisation de nouveaux modes de visualisation pour compléter cette résolution et proposons un outil de visualisation 3D immersive dont nous évaluons l'apport.



## Chapitre 2

# Le Renseignement d'Origine ÉlectroMagnétique (ROEM)

Pour mieux comprendre les enjeux du ROEM et sa légitimité en tant que cas d'application de visualisation d'information, nous décrivons le domaine du ROEM et en extrayons les problématiques de visualisation d'information auquel il est confronté. Ces connaissances sont directement issues d'entretiens semi-directifs et d'observations réalisées selon la méthode de la pensée à voix haute (*think-aloud protocol*) auprès d'opérateurs du ROEM, dont les détails confidentiels ne sont pas explicités dans ce document.

### 2.1 Description

Afin de décrire le domaine du ROEM, nous explicitons son origine, ses besoins, ses données et son contexte d'usage.

#### 2.1.1 Origine

Dans un contexte militaire, connaître les acteurs d'un théâtre opérationnel est primordial pour la sécurité des personnels embarqués. Grâce à l'utilisation des radars, cette identification est possible de deux manières différentes. La première, dite méthode active, consiste à envoyer une onde radar et à écouter l'onde réflétrie afin d'en déduire l'azimut, la distance et dans une certaine mesure la taille du système qui a réflétrie l'onde (cf. figure 2.1). La deuxième méthode, dite passive, consiste à écouter les signaux radar émis par les systèmes environnants, identifier leurs caractéristiques et les comparer aux caractéristiques contenues dans une base de référence auxquelles sont généralement associés un type de radar et les systèmes porteurs de tels types de radars (cf. figure 2.1).

L'identification d'un système émettant un signal radar à l'aide des caractéristiques de son signal est possible dans la mesure où il existe une grande diversité de radars ayant, pour la plupart, des caractéristiques de signal singulières.



FIGURE 2.1 – Usage du radar de manière active pour la détection d'un avion par un bateau et usage du radar de manière passive pour l'identification du bateau par l'avion

Le ROEM a pour objectif de remplir la base de référence qui permet l'identification passive des acteurs d'un théâtre opérationnel. Pour remplir cette base de référence, les opérateurs du ROEM tentent d'identifier les caractéristiques de signaux radars interceptés par intérêt ou par opportunité, partout dans le monde. L'identification des caractéristiques de ces émissions est principalement réalisée par des traitements automatiques. Cependant, elle nécessite une intervention humaine pour vérifier les résultats ou gérer manuellement les cas délaissés par le traitement, c'est-à-dire pour lequel le traitement automatique n'a pas été concluant. Cette analyse manuelle, du ressort de la visualisation d'information, est le cas d'application de nos travaux.

### 2.1.2 Besoins

Le besoin principal du ROEM est d'identifier ou de valider les caractéristiques de signaux radars contenus dans un jeu de données. Si quelques radars très spécifiques émettent en continu, la majorité des radars émettent des séries d'impulsions électromagnétiques de sorte que leur signal correspond à une succession d'impulsions. Chaque impulsion est émise pendant une certaine durée appelée DI (Durée d'Impulsion) et à un certain intervalle temporel de la précédente, appelée PRI (Période de Répétition de l'Impulsion). Bien que ces deux attributs soient souvent représentés sur une même échelle, la DI est négligeable devant la PRI. Pour faciliter la synchronisation du signal émis et du signal reflété lors de l'écoute active, les caractéristiques en DI et en PRI se répètent régulièrement dans le temps sous la forme d'un motif, dont la période de récurrence est appelée PRM (Période de Répétition du Motif). Chaque impulsion est aussi émise à une

certaine fréquence et à une certaine puissance, appelée niveau (cf. figure 2.2). En fonction des propriétés que l'on veut donner au radar ou pour complexifier l'identification, les valeurs de DI, de PRI, de fréquence et de niveau des impulsions peuvent varier au cours de l'émission. Alors que les valeurs de fréquence et de niveau varient indépendamment, les valeurs de DI et de PRI varient uniquement à l'échelle du motif. Les caractéristiques de signaux radar sont donc les valeurs ordonnées de DI et de PRI de chaque impulsion du motif, la valeur de PRM et la variation des valeurs de fréquence et de niveau. On ajoute à cela des caractéristiques physiques pouvant être singulières comme des altérations de l'émetteur (ex : une DI plus longue en fin d'émission) et la vitesse de rotation de l'antenne radar (le radar émet rarement dans une seule direction mais balaye l'horizon à une vitesse de rotation spécifique).

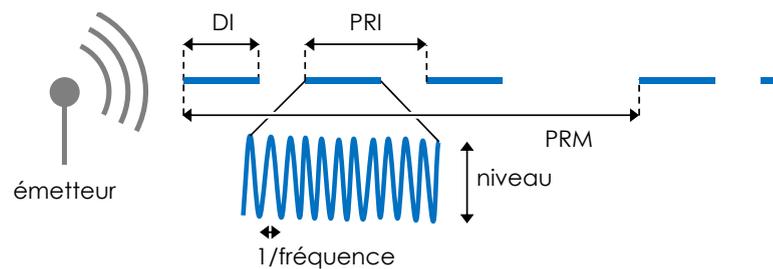


FIGURE 2.2 – Caractéristiques d'un signal radar émis

### 2.1.3 Données

Les différentes caractéristiques d'un signal radar ne sont pas directement les données mesurées par les capteurs. Les capteurs du ROEM mesurent les variations en fréquence et en niveau dans le temps. Quand ils détectent une succession de valeurs de niveau important à des fréquences proches, ils créent ce que l'on appelle une impulsion échantillonnée. Cette dernière est définie par une date d'arrivée, appelée TOA (Time Of Arrival), une DI, une valeur de niveau et un ensemble de valeurs de fréquence prises au cours du temps. Pour des raisons de quantité de données disponible en mémoire, les valeurs de fréquence à l'intérieur d'une impulsion sont moyennées sous la forme d'une impulsion synthétique ayant donc une valeur de fréquence unique. Parmi les caractéristiques des signaux radar, la PRI et la PRM ne sont pas directement mesurables et sont donc identifiées à l'aide de la différence de TOA de deux impulsions successives, appelé DTOA (Delta of TOA). Les données mesurées contiennent donc des objets correspondants aux impulsions et définis par cinq attributs : une TOA, une DI, une DTOA, une fréquence et un niveau (cf. figure 2.3 et tableau 2.1). À cela s'ajoutent d'autres attributs spécifiques à chaque capteur comme la direction d'arrivée, appelée DOA (Direction Of Arrival).

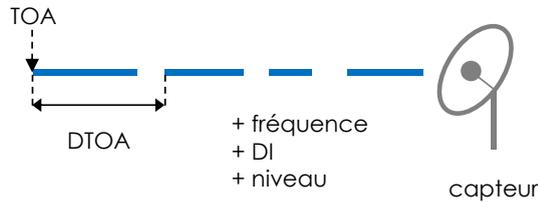


FIGURE 2.3 – Caractéristiques d'un signal radar intercepté

id	TOA (ms)	DI ( $\mu$ s)	DTOA (ms)	fréquence (MHz)	niveau (dB)
1536	0,23657	2,386	8,1245	5148,36	45,69
1537	8,36107	2,348	16,249	5146,86	36,48

TABLE 2.1 – Exemple de contenu d'un fichier du ROEM

### 2.1.4 Contexte d'usage

Une fois les données récoltées, elles peuvent être transmises à un centre sol ou analysées directement à bord du système. Quel que soit l'endroit où se déroule l'analyse, les contraintes de confidentialité du domaine sont telles que ces lieux sont coupés de toutes communications extérieures impactant le moral des opérateurs mais aussi les usages d'aides ou d'améliorations externes (pas d'internet ni de mises à jour régulières). Les opérateurs travaillent sur des ordinateurs de bureau souvent associés à plusieurs écrans leur permettant d'utiliser en parallèle les outils nécessaires à l'analyse et des outils de consolidation de cette analyse, comme un accès à la base de référence des radars ou à une cartographie de la zone en cours d'analyse. Enfin, le contexte militaire actuel tend à diminuer la période d'affectation des opérateurs à un métier donné. Ces derniers ont donc de moins en moins le temps de se former au métier du ROEM et n'ont pas le temps de devenir experts.

### 2.1.5 Synthèse

Le ROEM a pour objectif de remplir une base de données qui permettra l'identification de systèmes radar. Pour ce faire, les opérateurs du ROEM (Renseignement d'Origine ElectroMagnétique) tentent d'identifier les caractéristiques de signaux radar contenus dans des données interceptées. Ces caractéristiques sont la DI (Durée d'Impulsion), la PRI (Période de Répétition de l'Impulsion), la PRM (Période de Répétition du Motif), la fréquence et le niveau que les opérateurs doivent extraire de fichiers contenant des TOA (Time Of Arrival), DI, fréquences, niveaux et DTOA (Delta of TOA). Cette activité nécessite d'être réalisée dans des environnements contraints par l'isolation et parfois l'inconfort, et les opérateurs devant la réaliser seront amenés à être de moins en moins experts.

## 2.2 Problématiques

L'identification des caractéristiques de signaux radars engendre un certain nombre de problématiques vis-à-vis de la visualisation d'information. Dans les paragraphes suivants nous identifions les problématiques spécifiques au domaine du ROEM et en extrayons des problématiques de visualisation d'information.

### 2.2.1 Grande quantité de données

Les radars les plus courants émettent en moyenne des impulsions toutes les 1 *ms*. Si l'on considère une écoute de 8 minutes ayant intercepté les signaux de cinq radars différents émettant une impulsion toutes les 1 *ms* on obtient un fichier contenant plus de 2 400 000<sup>1</sup> impulsions ayant au moins cinq attributs différents. Sur ces 2 400 000 impulsions, plus de 90% seront caractérisées automatiquement par le traitement, mais les 10% restants représentent toujours un volume conséquent. De plus, ces 10% correspondent en général à du bruit, à des émissions trop complexes pour être identifiées par le traitement automatique ou à des impulsions appartenant à des radars contenus dans les 90% mais ayant été rejetées par le traitement automatique. Si dans le premier cas l'analyse visuelle des 10% n'a pas d'intérêts, dans le deuxième cas elle est un point crucial du ROEM et dans le troisième cas elle nécessite d'être réalisée sur le fichier entier (90% + 10%) dont la taille est très importante.

Un écran standard ayant pour résolution 1920 par 1080 pixels est composé de 2 073 600 pixels. La plupart des fichiers du ROEM contiennent donc plus de données que de pixels disponibles sur un affichage standard. En visualisation d'information cela correspond à la définition de **big data** [56] qui est une problématique majeure de la visualisation de données. Cette problématique peut impacter la perception et l'interprétation des données et nécessite donc la mise en place de métaphores de représentation adaptées.

### 2.2.2 Données complexes

Les données du ROEM correspondent à des mesures faites sur des signaux radar, leurs caractéristiques sont donc définies par un ensemble d'attributs directement issus de paramètres physiques. Un fichier de données ROEM contient une liste d'éléments correspondant à des impulsions et définis par au moins cinq attributs : la TOA, la DI, la DTOA, la fréquence et le niveau.

---

1. Le volume de données à traiter en ROEM est une information sensible. Les chiffres donnés ne représentent donc pas la réalité mais correspondent à une marge inférieure.

Selon la définition de Shneiderman [83], les données du ROEM correspondent à des données **multidimensionnelles** car elles possèdent plus de trois attributs, et à des données **temporelles** car elles contiennent le temps comme attribut. Ces multiples attributs sont tous des attributs **quantitatifs** [15] et il sont organisés de manière **séquentielle**. Il n'y a pas de relations entre les données comme peuvent le contenir les données de type graphe ou les données hiérarchiques [73]. En revanche ces attributs se distinguent par leur nature, étant soit référentielle soit caractéristique [77]. Contrairement aux attributs caractéristiques, les attributs référentiels reflètent le contexte des données. En ce qui concerne le ROEM, les émissions sont enregistrées dans le temps mais aussi sur différentes gammes de fréquence et parfois selon différentes directions. La TOA, la fréquence et la DOA sont donc des attributs **référentiels** alors que tous les autres sont des attributs **caractéristiques**. En ce qui concerne l'aspect temporel des données, Aigner propose une classification basée sur trois aspects : l'organisation du temps (linéaire ou cyclique), la fenêtre temporelle (ponctuelle ou par intervalles) et la structure temporelle (ordonnée, ramifiée ou avec des perspectives multiples) [4]. Bien que les données du ROEM contiennent un aspect cyclique fort en raison de la présence de motifs, elles ne peuvent être considérées comme appartenant à la catégorie du temps cyclique car l'aspect cyclique concerne d'autres attributs que le temps. En ce qui concerne la fenêtre temporelle, comme une impulsion a une longueur (DI), les données du ROEM peuvent être considérées comme des intervalles de temps. Cependant, les valeurs de DI étant insignifiantes par rapport à l'échelle de temps d'une émission, elles sont considérées comme un attribut à part entière. Enfin, les valeurs de temps des données du ROEM ont un aspect quantitatif important mais d'un seul point de vue. En tant que tel, les données du ROEM ne sont ni ordinales ni n'ont des perspectives multiples et correspondent donc à la définition d'Aigner du **temps ramifié**.

### 2.2.3 Utilisateurs non-experts

La durée moyenne d'une affectation militaire est de plus en plus courte et le domaine du ROEM ne fait pas exception. Cette courte durée comparée au temps nécessaire à maîtriser un domaine aussi complexe impacte beaucoup l'expertise des opérateurs. Les nouveaux arrivants n'ont pas le temps nécessaire pour se former à gérer les cas les plus complexes.

Rasmussen classe l'expertise utilisateur selon la façon dont les utilisateurs réalisent les tâches qu'ils ont à faire [78]. Un utilisateur novice se base uniquement sur des connaissances alors qu'un utilisateur un peu plus expérimenté peut directement se fier aux règles, découlant des connaissances, qu'il a acquises en pratiquant. Enfin un utilisateur expert a intégré les règles dans son fonctionnement et les utilise de manière inconsciente au travers de ses compétences. Dans le domaine du ROEM, les opérateurs les plus anciens

utilisent leurs compétences alors que les nouveaux arrivants doivent se baser uniquement sur des connaissances. Les outils de visualisation du ROEM doivent donc permettre une analyse uniquement basée sur des **connaissances**.

### 2.2.4 Écoutes multiples

Lors de l'interception de signaux radar, il est possible que plusieurs émetteurs se trouvent dans la zone d'écoute, les fichiers du ROEM peuvent donc contenir des signaux de plusieurs radars. Cette éventualité implique de d'abord distinguer les impulsions qui appartiennent aux différents signaux avant de pouvoir identifier leurs caractéristiques respectives. Ajouté à cela, la présence de plusieurs signaux rend la DTOA complètement inutilisable car elle fournit potentiellement la différence de temps entre deux impulsions appartenant à des signaux différents (cf. figure 2.4).

La distinction des impulsions appartenant à différents signaux radar nécessite d'identifier les impulsions ayant les mêmes caractéristiques. Cela correspond au besoin d'**associer** des données ayant des valeurs similaires en visualisation d'information [99]. Dans le cas où deux signaux radar ont des caractéristiques communes, il est d'abord nécessaire de les distinguer en **corrélant** plusieurs attributs.

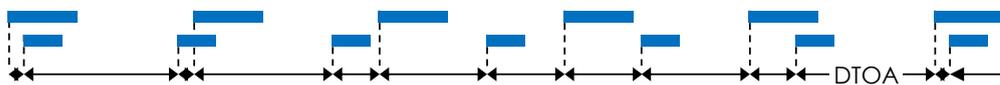


FIGURE 2.4 – Valeurs de DTA sur des données contenant plusieurs signaux radar

### 2.2.5 Variation complexe des données

Que ce soit à cause de contraintes physiques, afin d'améliorer la détection ou pour complexifier l'identification, les valeurs des impulsions varient de manière de plus en plus complexe. Une première source de variation est causée par la rotation de l'émetteur. Afin de permettre une détection à 360°, les émetteurs radar sont en rotation permanente. De la même manière que lorsqu'un observateur regarde la lumière d'un phare, le signal intercepté n'a pas une puissance constante. Son niveau ondule de sorte que le niveau intercepté est égal au niveau émis à l'instant où l'émetteur est face à l'intercepteur et inférieur sinon (cf. figure 2.5). Le niveau maximum correspond donc au niveau émis et la période de répétition de ce niveau correspond à la durée de rotation de l'émetteur. En parallèle, le niveau d'émission peut varier par paliers car cela permet à l'émetteur de

détecter des objets à différentes distances (cf. figure 2.6). Vis-à-vis de la complexification de l'identification, ce sont les attributs de fréquence, de DI, de PRI et de PRM qui sont amenés à varier. Afin de complexifier leur identification, les radars les plus récents sont capables de modifier leur fréquence de manière pseudo-aléatoire (cf. figure 2.7). Les motifs en DI et PRI nécessaires à l'émetteur pour le bon fonctionnement de la détection peuvent être complexifiés en augmentant leur taille (cf. figure 2.8). Enfin, la PRM peut être modifiée par paliers, ajoutant un dernier niveau de complexité à l'identification (cf. figure 2.9).

Ces différentes variations ne sont pas directement des problématiques de visualisation mais elles engendrent des besoins en visualisation pour mener à bien l'analyse. Vis-à-vis de la distinction des signaux radar, cette complexité nécessite des besoins autres qu'une simple association. Certains attributs n'ayant pas de valeurs constantes ou ayant de trop nombreuses valeurs, il faut corrélérer l'association à une **détection de singularité** comme une courbe de niveau ou un motif. Vis-à-vis de l'identification, cela implique un besoin d'**accès aux impulsions** une par une pour identifier les caractéristiques du motif, une **identification** des variations de niveau (valeur maximale et période) et une **distinction** de toutes variations singulières dans les valeurs de fréquence.



FIGURE 2.5 – Variation ondulatoire du niveau



FIGURE 2.6 – Variation du niveau par palier



FIGURE 2.7 – Variation pseudo-aléatoire de la fréquence



FIGURE 2.8 – Long motif en DI et PRI (six impulsions)



FIGURE 2.9 – Variation de la PRM par palier

### 2.2.6 Données erronées

Lors de leur parcours dans l'atmosphère, les impulsions peuvent subir des déformations. Les valeurs de niveau, fréquence et DI interceptées peuvent ainsi être légèrement différentes des valeurs émises. Cette altération est problématique lors de la distinction des impulsions. Deux signaux radar ayant des valeurs d'attributs proches ne permettront pas d'association sur ces attributs car certaines impulsions d'un signal pourront avoir les caractéristiques de l'autre signal. Ajouté à cela, si la valeur de l'impulsion est trop différente de sa valeur initiale, elle peut être considérée comme du bruit et ne pas être prise en compte. Enfin, l'altération peut aussi provenir de l'émetteur et être singulière. Dans ce cas-là il est important de l'identifier.

Pour gérer les signaux ayant des valeurs d'attributs proches, il faut considérer leurs attributs comme ayant des valeurs identiques et donc différencier ces signaux sur d'autres attributs. Cela implique de réaliser l'analyse de manière **multidimensionnelle**. Vis-à-vis des valeurs trop erronées, il est nécessaire de remettre en question la validité des valeurs et donc de toute l'analyse. La problématique de visualisation engendrée est donc de rendre compte du fait que les **données sont non fiables**. Enfin, l'**identification** des valeurs doit pouvoir s'adapter à leurs variations et, en fonction du contexte, se réaliser au niveau de l'impulsion ou d'un **groupe** d'impulsions [73].

### 2.2.7 Bruit

La duplication des ondes entraînée par des diffractions et la présence d'autres émissions électromagnétiques, comme les ondes radio, génèrent un bruit intercepté par les capteurs.

Les problématiques de visualisation amenées par le bruit sont multiples. Le bruit va engendrer les mêmes problématiques que les données erronées mais aussi rendre la DTOA non pertinente.

### 2.2.8 Données manquantes

Il arrive que lors de son parcours dans l'atmosphère une impulsion soit diffractée de sorte qu'elle ne soit pas interceptée par le capteur. Qu'elle impacte la distinction des signaux ou l'identification des caractéristiques, une donnée manquante correspond à une perte d'information pouvant entraîner une confusion lors de l'analyse et a aussi un impact sur la pertinence de la DTOA. Si une impulsion vient à manquer, la DTOA de l'impulsion précédente correspondra à la somme de sa PRI avec celle de l'impulsion manquante (cf. figure 2.10). L'incohérence de DTOA que cela va engendrer peut amener les opérateurs, notamment les novices, à ne pas tenir compte des impulsions précédant les impulsions manquantes, s'abstrayant d'un nouveau morceau de signal.

La perte d'information que les impulsions manquantes engendrent, est compensable en procédant à une **comparaison** avec d'autres instances de motifs. Dans le cas où aucune instance n'est complète, une telle comparaison permet de reconstruire le motif. La non-pertinence de la DTOA engendre quant à elle une problématique de représentation des **données non fiables**.



FIGURE 2.10 – Mesure de la DTOA sur des données ayant des impulsions manquantes

### 2.2.9 Données dupliquées

Afin d'obtenir des valeurs de fréquences les plus précises possibles, les capteurs actuels sont composés d'une multitude de capteurs interceptant chacun une gamme de fréquences spécifique. Lorsqu'une impulsion a une valeur de fréquence à cheval entre deux gammes, il est possible qu'elle soit interceptée par deux capteurs, dupliquant ainsi l'impulsion dans le jeu de données (cf. figure 2.11). Cette duplication ne correspond pas à une caractéristique du signal et ne nécessite donc pas d'être relevée, par contre, elle augmente le volume de données, fausse les valeurs de DTOA (une impulsion sur deux a une DTOA nulle) et fausse les valeurs de fréquence (une impulsion sur deux a une fréquence légèrement fausse).

Les besoins en visualisation nécessaires à la résolution de cette problématique, et donc à la suppression du doublon le plus erroné, sont multiples. Les impulsions ayant les valeurs les plus proches des données avant interception sont celles avec le plus fort niveau. Or, les valeurs de niveau d'un même signal varient forcément, il n'est donc pas possible de gérer cette problématique en détectant des groupes de niveau. De même, les valeurs de fréquence sont très similaires de sorte qu'elles ne sont pas non plus associables facilement. Dans le pire des cas (courbes de niveau indétectables et fréquences non associables), l'unique moyen de régler cette problématique est d'**accéder** aux valeurs de chaque impulsion une par une de façon à sélectionner, en cas de doublons temporels, les impulsions ayant le plus fort niveau.

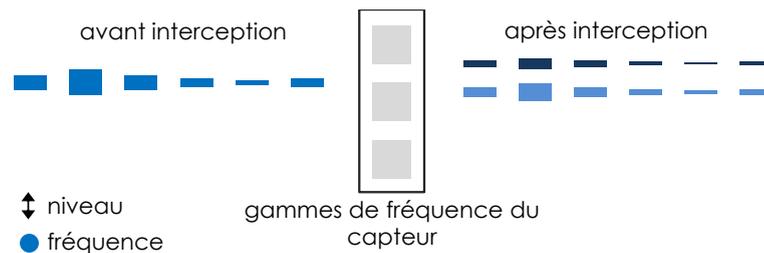


FIGURE 2.11 – Données avant et après interception par un capteur, illustrant une duplication

### 2.2.10 Synthèse

Le domaine du ROEM fait face à de nombreuses problématiques du domaine de la visualisation d'information. Les outils de visualisation du ROEM doivent gérer des quantités de données de l'ordre du big data pour des données multidimensionnelles, temporelles, non cycliques et ayant des attributs quantitatifs et de natures différentes (référentielle ou caractéristique). Tout en considérant ces contraintes, ces outils doivent couvrir les besoins d'identification des valeurs, d'association et de détection de singularité, à l'échelle de l'impulsion et du jeu de données. Enfin, les utilisateurs face à ces systèmes doivent pouvoir réaliser leur tâches en se basant uniquement sur leurs connaissances et les réaliser dans des environnements potentiellement contraints.

## 2.3 Conclusion

Le domaine du ROEM se distingue par sa complexité et par l'accumulation des problématiques qu'il engendre. Vis-à-vis de la visualisation d'information, le ROEM doit faire face à des données en quantité, des données complexes, des tâches complexes et des utilisateurs novices. Cet agrégat de problématiques majeures du domaine de la visualisation en fait un cas d'application idéal pour s'intéresser à la résolution de problématiques

cumulées. La définition des caractéristiques du ROEM ainsi que l'identification des problématiques de visualisation auquel il est confronté sont la première contribution de ces travaux [26].

Avant de chercher à identifier des solutions à ces problématiques nous allons commencer par nous intéresser à la façon dont ces problématiques sont actuellement gérées et dans quelles mesures les solutions identifiées les résolvent.

## Chapitre 3

# État de l'art

Après avoir présenté le domaine du ROEM qui contient une agrégation de problématiques de visualisation de données, nous nous intéressons à la façon dont l'existant traite ces problématiques agrégées que sont la quantité de données, les données multidimensionnelles, les tâches complexes et les utilisateurs ayant peu d'expertise. Pour ce faire, nous identifions les représentations répondant à chacune des problématiques ciblées, et regardons dans quelle mesure elles couvrent les autres problématiques. Nous commençons par nous intéresser aux solutions identifiées comme répondant à la problématique de quantité de données : les représentations synthétiques et détaillées, les représentations condensées et les représentations étendues. Ensuite nous nous intéressons aux solutions répondant à la problématique des données multidimensionnelles : l'encodage visuel multiple et les multi-vues. Les autres problématiques n'étant pas associées à des solutions spécifiques, nous nous intéressons à l'animation et la représentation écologique pour leur apport en terme d'amélioration de la perception, potentiellement bénéfique à la résolution de l'ensemble des problématiques ciblées.

### 3.1 Gestion de la quantité de données

La quantité de données est un problème en visualisation d'information quand elle est telle qu'il n'est pas possible de représenter chaque donnée dans son entièreté (tous attributs compris) de manière perceptible à l'écran. Les trois facteurs de cette problématique sont donc la quantité de données mais aussi la taille de représentation de chaque donnée et enfin la taille de l'affichage. Pour répondre à cette problématique il est donc nécessaire de réduire, ou d'augmenter selon le cas, chacun de ces facteurs. La réduction de la quantité de données passe par la synthèse ou l'affichage détaillé mais partiel, des données. La réduction de la taille de représentation passe par l'utilisation de représentations

condensées. Et enfin, l'augmentation de la surface d'affichage passe par l'utilisation de représentations étendues.

### 3.1.1 Représentations synthétiques et détaillées

Les représentations synthétiques consistent à diminuer la quantité d'éléments graphiques tout en restituant le plus de contenu possible (cf. figure 3.1). Une première façon de diminuer cette quantité est d'associer un groupe de données à un unique élément graphique encodant une synthèse des valeurs des données du groupes. Selon si ce découpage est arbitraire ou défini par un critère de similarité entre les données, il sera appelé agrégation ou *clusterization* [10]. Ce regroupement peut concerner les valeurs des données ou les relations entre les données. Les regroupements de valeurs sont représentés par diverses techniques comme les cartes de chaleur [76] ou les *glyphmaps* [47] alors que les regroupements de relations sont l'exclusivité du *bundling* qui se présente sous de nombreuses formes [67]. Une deuxième méthode pour diminuer la quantité de données tout en essayant de restituer le plus de contenu possible est l'échantillonnage. Échantillonner des données consiste à supprimer une partie des données en s'assurant que les données restantes sont bien représentatives de l'ensemble. Selon les cas, les données sont supprimées aléatoirement, ou selon des processus plus complexes permettant de meilleures restitutions des données [38]. L'échantillonnage est bien souvent transparent de sorte qu'aucune représentation spécifique ne lui est associé.

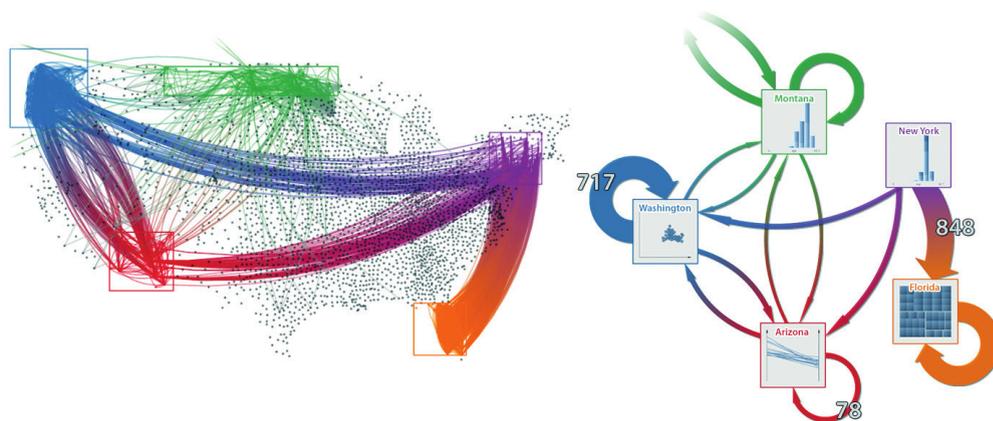


FIGURE 3.1 – Usage d'une vue synthétique pour représenter les flux migratoires au sein des États-Unis d'Amérique [92]. La vue synthétique permet d'identifier les flux internes aux régions, inaccessible sur la vue d'origine à cause de l'occlusion due à la quantité de données.

Une telle réduction des données permet de respecter les limites perceptives des utilisateurs tout en restituant en grande partie l'information contenue dans les données. Cependant, pour tous les besoins nécessitant l'accès aux valeurs exactes, ce genre de représentation n'est pas suffisant. Pour cela il est possible de diminuer la quantité de données en se contentant de n'en afficher qu'une partie. Le choix de la partie des données représentée

dans ces vues détaillées est souvent modifiable pour permettre l'accès à l'ensemble des données. Quand ce choix est défini par des critères de visualisation spatiale, la modification correspond à de la navigation (entre des groupes de données représentées côte à côte). Quand ce choix est défini par des critères sur les valeurs des données, la modification est alors assimilée à du filtrage. Couplées aux vues synthétiques, ces vues détaillées permettent à l'utilisateur d'accéder au niveau de détail qu'il souhaite sur une partie des données tout en maîtrisant la relation de cet échantillon à l'ensemble des données (cf. figure 3.2). Ce type de représentation est défini en fonction de l'organisation de ses vues ainsi les représentations ayant des vues distinctes sont appelées *Overview+Detail*, les représentations ayant des vues imbriquées sont appelées *Focus+Context* et enfin, si l'on considère que deux vues ne sont pas forcément séparées spatialement mais peuvent aussi être accessibles à des moments différents, et donc séparées temporellement, le zoom correspond au troisième type d'agencement de vues détaillées et synthétiques [34].

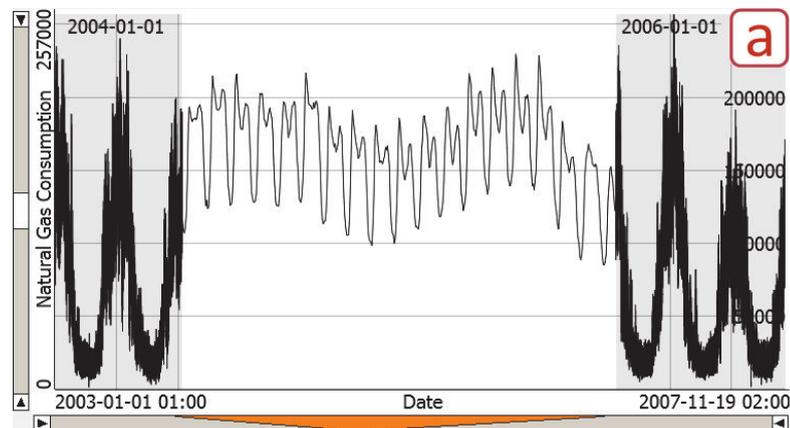


FIGURE 3.2 – Usage combiné d'une vue synthétique et d'une vue détaillée pour représenter la consommation de gaz naturel au cours du temps [11]. La vue synthétique, qui permet d'identifier les variations globales, est détaillée en son centre permettant d'identifier une partie spécifique des variations locales.

Dans un contexte ROEM par exemple, les phénomènes de duplication en fréquence nécessitant de comparer les valeurs de fréquence et de niveau à très grandes échelles, sont gérables au cas par cas et donc à l'aide de vues synthétiques et détaillées. En revanche, lors de l'identification d'un motif récurrent, si le motif est très long et très endommagé, il est nécessaire d'analyser en même temps un nombre important de ses occurrences. Cela implique un accès à la valeur de toutes les données, qui n'est pas possible à l'aide de représentations synthétiques et détaillées. Ainsi, les représentations synthétiques et détaillées gèrent la quantité de données mais ne permettent pas de résoudre les tâches complexes nécessitant l'accès à l'ensemble des valeurs.

### 3.1.2 Représentations condensées

Les représentations condensées consistent à réduire au maximum la taille attribuée à la représentation de chaque donnée ainsi que les espaces qui les séparent (cf. figure 3.3). La mise en œuvre de cette technique implique de représenter chaque donnée par des éléments graphiques de petites tailles (pouvant aller jusqu'à quelques pixels). Vis-à-vis de la réduction des espaces qui séparent chacun de ces éléments, la principale façon de faire est de ne pas exploiter l'aspect quantitatif de la position (comme il peut être fait sur un simple graphique 2D) et donc de représenter les données par des éléments agencés côte à côte [65]. D'autres travaux exploitent le fait que leurs données remplissent naturellement tout l'espace comme les données géographiques et utilisent donc les attributs concernés pour encoder la position de leurs éléments graphiques [47]. Un cas particulier de représentation condensée est celui des *treemaps*. Les *treemaps* n'ont pas vocation à permettre l'affichage de grandes quantités de données car bien qu'ils exploitent l'aspect de réduction de l'espace, ils exploitent aussi la taille des éléments graphiques. Cette technique nous permet cependant d'identifier une autre façon de répartir les éléments graphiques en les condensant [80].

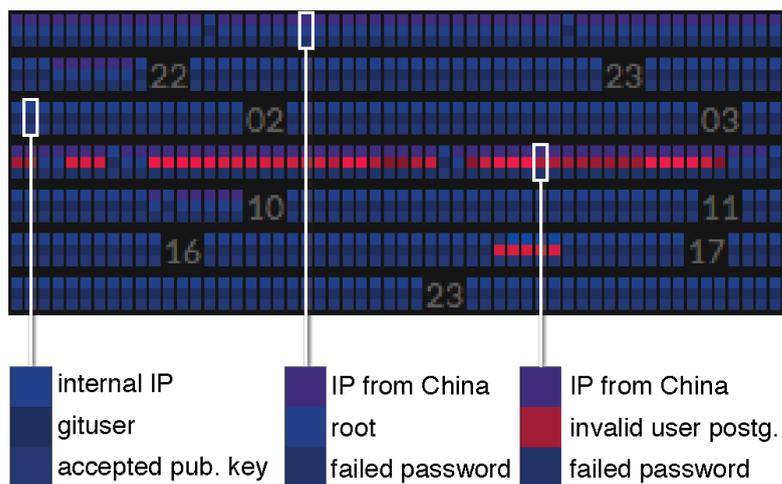


FIGURE 3.3 – Usage d'une représentation condensée pour analyser des logs réseau [65]. Les logs sont représentés par des empilements de trois carrés de couleur et sont positionnés côte à côte selon leur valeur temporelle.

Vis-à-vis de l'exemple sur l'identification de motif du ROEM, si l'on représente chaque donnée par un rectangle de plusieurs pixels de large, colorié selon des valeurs d'attributs, on peut y encoder un à deux attributs maximum (en scindant le cube en deux). Dans un cas optimal, la détection de motif nécessite uniquement les valeurs de DI et de DTOA, mais dans le cas de signaux mélangés ou bruités, il est nécessaire de conforter la détection avec d'autres attributs comme la fréquence, la TOA ou la DOA, ce qui dépasse la quantité d'attributs représentables de notre exemple. Ainsi, la gestion de l'espace d'affichage mise en place dans les représentations condensées permet de représenter un grand nombre de

données, en revanche la surface consacrée à la représentation de chaque donnée étant limitée, ces représentations ne peuvent encoder qu'un nombre limité d'attributs.

### 3.1.3 Représentations étendues

Grâce aux nouveaux dispositifs comme les grandes tables tactiles, les murs d'écran (*Wall*), les salles immersives (*CAVE*) ou encore les casques immersifs, la surface de visualisation potentielle a énormément augmenté (cf. figure 3.4 et 3.5). Que ce soit au travers d'un accroissement du champ de vision accessible ou du nombre de pixels disponibles (facteurs actuels de la limite perceptive [56]), ces dispositifs augmentent le nombre d'éléments perceptibles affichables et donc de données représentables [60].

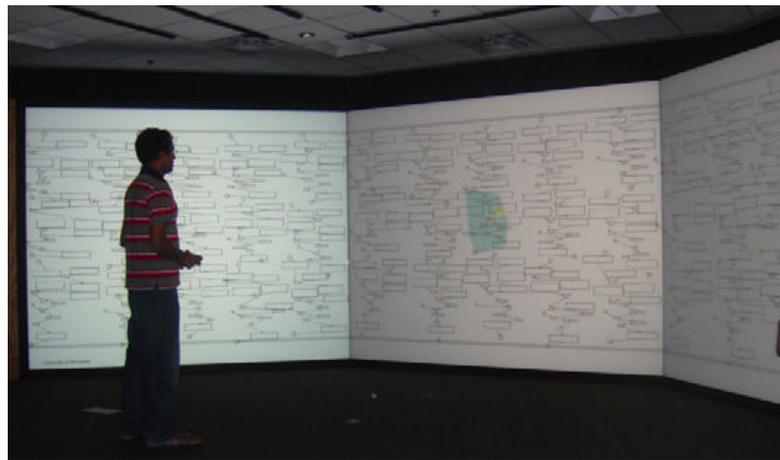


FIGURE 3.4 – Usage d'un mur d'écran pour représenter des données en grande quantité [60]. L'accroissement du champ de vision accessible ainsi que l'accroissement du nombre de pixels disponibles permettent de représenter une grande quantité de données.



FIGURE 3.5 – Usage d'un casque de réalité virtuelle pour explorer des données complexes et en grande quantité [36]. L'accroissement du champ de vision accessible permet de s'abstraire de la quantité de données pour se concentrer sur la représentation de données complexes.

Vis-à-vis du ROEM, il serait possible de représenter toutes les données dans une seule vue avec un niveau de détail maximal. Cependant, cela ne permettrait pas pour autant de gérer les utilisateurs novices ou les tâches complexes. Ainsi, l'utilisation de représentations étendues facilite l'utilisation de grandes quantités de données mais n'apporte pas de solutions aux autres problématiques et nécessite donc d'être couplée avec d'autres techniques de visualisations.

## 3.2 Gestion des données multidimensionnelles

Représenter l'aspect multidimensionnel de données implique de pouvoir encoder visuellement tous les attributs des données. Pour ce faire il est possible de multiplier les encodages sur une même représentation ou de paralléliser la représentation des données en les encodant par attributs. Nous nous intéressons ainsi aux méthodes d'encodages visuels multiples et aux méthodes de visualisation en parallèle nommées mutli-vues.

### 3.2.1 Encodages visuels multiples

Dans une représentation, les valeurs des données sont encodées à l'aide de variables visuelles comme la position, la couleur, la taille ou encore la forme [15]. Chacune des variables visuelles peut encoder un attribut différent de sorte que si ces variables sont compatibles, elles permettent de représenter autant d'attributs que de variables. La représentation *scatterplot* fait usage de cette caractéristique en permettant d'encoder, dans ses versions les plus standards, au moins cinq attributs (cf. figure 3.6). Les *scatterplot* utilisent principalement la position (en deux dimensions), la couleur, la taille et la forme auxquelles peuvent s'ajouter l'usage de la position en trois dimensions (de préférence stéréoscopique [70]), la transparence et bien d'autres variables. L'usage de la troisième dimension est sujette à débat dans la communauté de visualisation d'information car elle s'accompagne de nombreux inconvénients comme l'occlusion et la déformation liée à la perspective [72]. Son usage nécessite donc de s'assurer que ses bénéfices compensent ses inconvénients.

De manière générale, les limites des encodages visuels multiples sont l'usage des variables de manière appropriée et leur compatibilité. L'usage des variables est contraint par leur pouvoir perceptif. Les variables visuelles peuvent mettre en avant trois types de propriétés perceptives : nominale, ordinale et quantitative [28]. En fonction des données et du pouvoir perceptif que l'on souhaite mettre en avant, certaines variables visuelles seront plus pertinentes que d'autres. Par exemple, il ne semble pas pertinent de représenter des données dont on souhaite mettre en avant l'aspect quantitatif par des formes car les

formes ont principalement un pouvoir perceptif nominal. Vis-à-vis de la compatibilité des variables, toutes les variables existantes ne peuvent pas être utilisées simultanément, que ce soit pour des contraintes physiques ou perceptives. Le nombre de variables utilisables en simultanément est donc limité. Par exemple, s'il est possible de faire varier la teinte, la saturation et la luminosité de la couleur en même temps, la perception risque d'en être impactée.

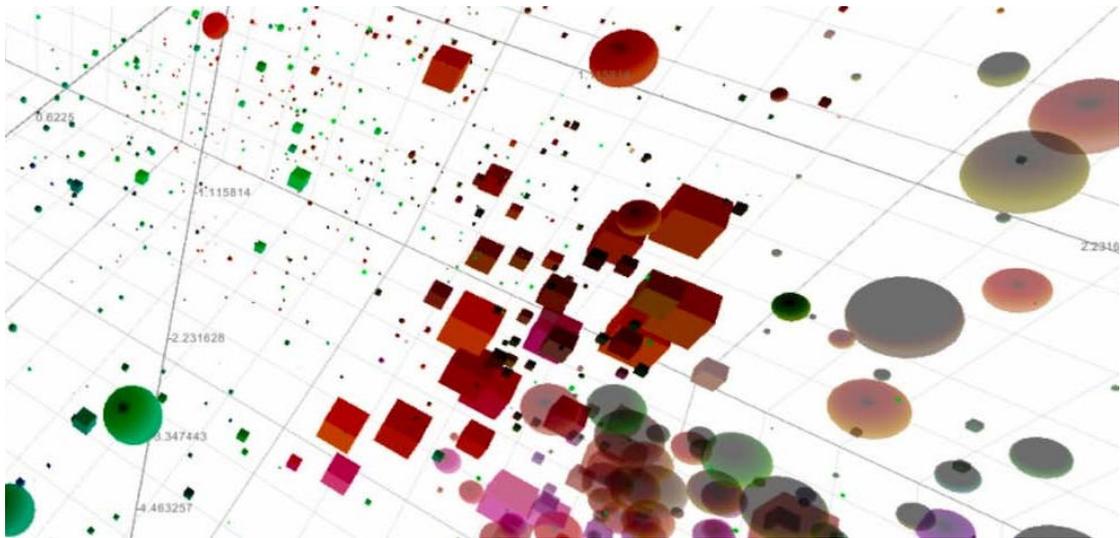


FIGURE 3.6 – Usage d'un environnement virtuel pour représenter des données complexes [36]. L'encodage des données à l'aide de la taille, la couleur, la forme, la position (x3) et la transparence permet de percevoir les valeurs de sept attributs en même temps.

Vis-à-vis du ROEM, les variables visuelles standards que sont les positions, la forme, la couleur et la taille sont suffisantes pour encoder les cinq attributs du ROEM. Cependant, les besoins du ROEM nécessitant principalement d'extraire l'aspect quantitatif de ces attributs, les variables visuelles proposées ne conviennent plus. Ainsi, l'encodage multiple est une solution pour la représentation de données multidimensionnelles dans la limite d'un faible nombre d'attributs ou de données ayant des propriétés adéquates.

### 3.2.2 Multi-vue et liaisons

Une autre façon de représenter les données multidimensionnelles est de dupliquer la représentation des données au travers de vues et d'encoder chaque vue en fonction d'attributs différents (cf. figure 3.7). Ces représentations permettent l'accès à tous les attributs, quelque soit leur nombre. Ces vues sont en général des graphiques 2D quadrillant les représentations et encodant ainsi au moins un attribut par axe. Le problème de ces représentations est la mise en relation des différents attributs. Si tous les attributs sont représentables, il n'est pas forcément possible de les utiliser conjointement. Pour pallier cela les graphiques 2D sont souvent alignés et ont un axe commun [44] ou sont utilisés

autant de fois qu'il y a de combinaisons d'attributs [96]. Si cette technique améliore la mise en relation des différents attributs, la corrélation reste limitée à chaque graphique et donc à un faible nombre d'attributs (à deux attributs pour les graphiques 2D).

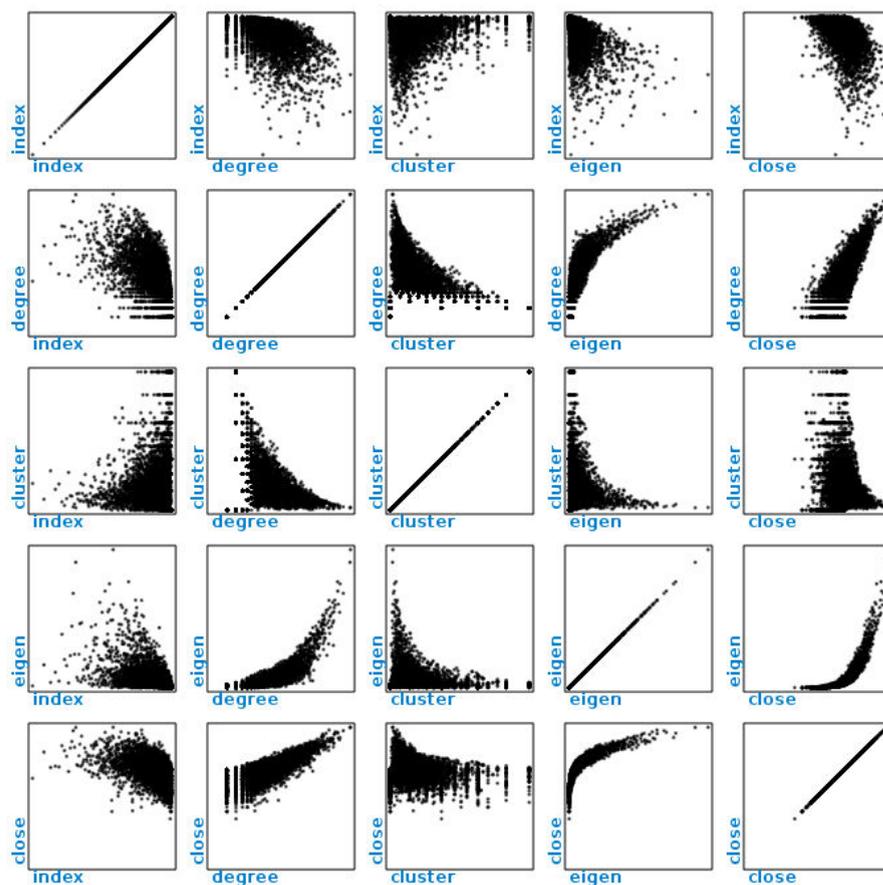


FIGURE 3.7 – Usage de la multi-vue pour représenter des données multidimensionnelles [96]. La confrontation de tous les attributs des données deux à deux permet d'identifier les corrélations entre attributs.

Pour résoudre cette problématique, les multi-vues sont augmentées d'outils de liaisons comme la coloration synchronisée des vues ou la liaison de différentes représentations d'une même donnée par un trait sur l'affichage. Les *parallel coordinates* sont un exemple très explicite de la mise en relation des données par des traits. Les *parallel coordinates* représentent chaque donnée sur un axe et ce pour chaque attribut. Les représentations de chaque donnée sont ensuite reliées par des traits permettant d'associer les valeurs de chaque attribut [55]. En théorie, la comparaison reste deux à deux mais la présence de liens renforce la corrélation globale. L'usage de liaisons est extensible à de nombreuses représentations faisant usage du multi-vue et notamment les ensembles de graphiques 2D (cf. figure 3.8).

La multi-vue est l'outil actuellement utilisé par de nombreux analystes du ROEM, mais c'est l'incapacité de ces outils à traiter les quantités de données qui est à l'origine de ces travaux. La mise en place de graphiques 2D pour des couples d'attributs divise

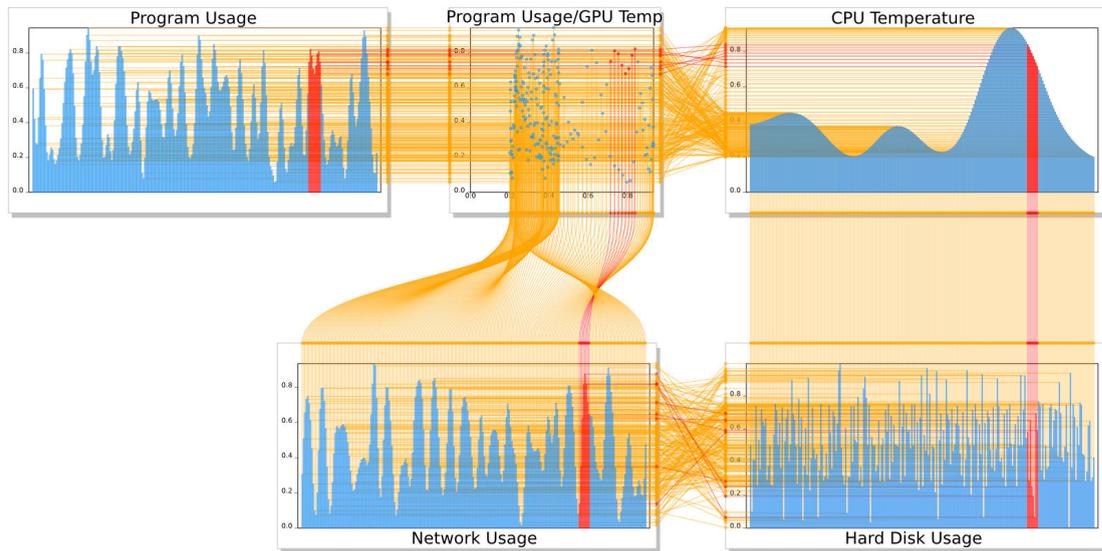


FIGURE 3.8 – Usage de la multi-vue avec liaison (couleur et connexions) pour représenter des données multidimensionnelles [95]. Les connexions permettent de mettre en relation les différents attributs des données à l'échelle de chaque donnée ou de l'ensemble et la couleur met l'accent sur un groupe de données en particulier.

d'autant la surface d'affichage et ne permet pas de représenter les données de manière perceptibles. Ainsi, si l'usage de multi-vues et de liaisons permet la représentation de données multidimensionnelles, il ne permet pas de gérer les problématiques de grandes quantités de données.

### 3.3 Autres

Les problématiques de complexité des tâches et de manque d'expertise des utilisateurs ne sont pas associées à des solutions en particulier, en revanche ces deux problématiques sont identifiées comme impactant la charge cognitive des utilisateurs. Nous nous intéressons ainsi aux solutions réduisant la charge cognitive des utilisateurs, en facilitant la perception et l'interprétation des données que sont l'animation et l'usage de représentations écologiques.

#### 3.3.1 Animations

L'animation est une transition visuelle ayant divers usages. Elle peut être utilisée pour faire la liaison entre différentes vues, facilitant alors la corrélation (cf. figure 3.9). Elle peut aussi illustrer un usage, améliorant ainsi la compréhension du système nécessaire aux utilisateurs novices [19]. Vis-à-vis des vues qu'elle met en relation, dans le cas de différentes représentations d'une même donnée, l'animation se comporte comme un outil

de liaison entre deux vues séparées temporellement [19]. Enfin, si l'animation ne semble pas compatible avec la quantité de données car nécessitant des traitements trop coûteux, certaines études prouvent le contraire en maximisant l'exploitation des capacités physiques des dispositifs d'affichage [39].

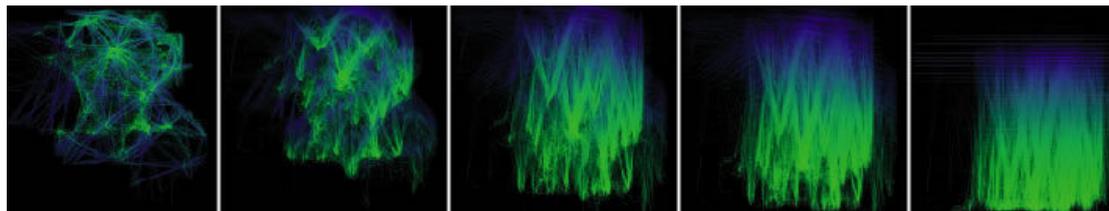


FIGURE 3.9 – Usage de l'animation pour faire le lien entre les localisations de trajets aériens et leur altitude [54]. L'animation conforte la perception de l'altitude déjà encodée par la couleur et fait le lien entre les différents attributs représentés.

L'usage de l'animation pour les représentations du ROEM permettrait de créer des vues séparées accessibles une par une, tout en gardant un lien entre ces dernières. Dans l'optique d'une séparation des attributs cela permettrait de gérer la quantité de données en libérant la place utilisée par l'encodage des données multidimensionnelles sans pour autant impacter l'aspect multidimensionnel garanti par l'animation. Cela poserait néanmoins un problème au niveau de la réalisation des tâches nécessitant l'accès à tous les attributs en même temps, comme l'identification de motif, car l'animation comme la multi-vue sans liaison ne permet pas la mise en relation globale des attributs. Vis-à-vis de la gestion des utilisateurs novices, l'animation améliorerait leur compréhension de la représentation, leur permettant de mieux se consacrer à la compréhension des données. Ainsi, l'animation facilite l'usage des représentations par des utilisateurs novices et, si elle propose une alternative à la gestion de données multidimensionnelles, elle est néanmoins confrontée aux problématiques de mise en relation.

### 3.3.2 Représentations écologiques

L'approche écologique de la perception visuelle est basée sur le fait que la perception est relative à chaque être car elle est influencée par son environnement [41] contrairement aux précédentes théories qui associaient la perception à un processus physique. Une représentation écologique est une représentation qui prend en compte l'impact de l'environnement sur la perception de l'utilisateur et l'utilise pour faciliter la perception. Il s'agit de reproduire des phénomènes visuels de l'environnement porteur des mêmes informations que celles que l'on veut transmettre à l'utilisateur pour en faciliter leur interprétation (cf. figure 3.10). Par exemple il est plus facile d'interpréter une valeur temporelle encodée par un taux de transparence car la transparence fait référence au phénomène d'effacement de vieilles photos, présent inconsciemment dans le référentiel

de nombreux utilisateurs [53]. Les représentations écologiques permettent une meilleure interprétation, ce qui est un atout pour la gestion de données en grande quantité, pour l'usage de données complexes et pour la réalisation de tâches complexes. Le principal défaut de ces solutions est qu'elles ne correspondent pas à des solutions en soi mais uniquement à des facilitateurs.

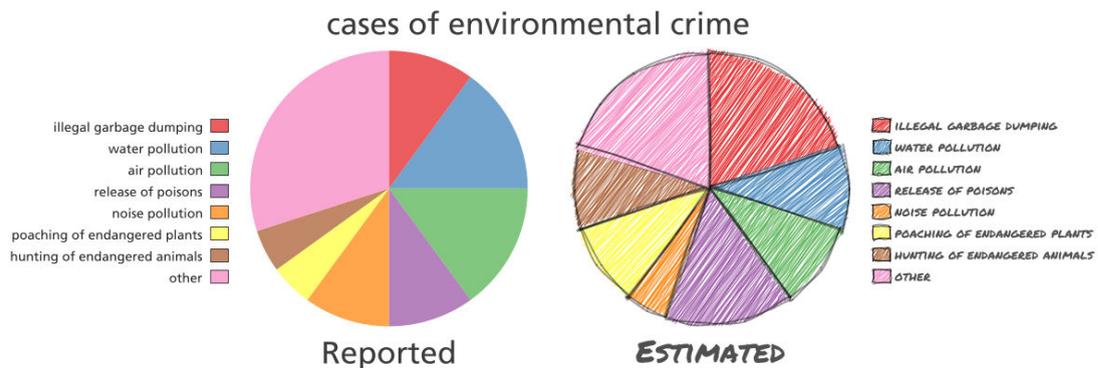


FIGURE 3.10 – Usage d'une représentation écologique pour différencier des données mesurées et des données estimées [103]. L'usage d'un style de dessin moins précis pour représenter les données estimées met en avant le fait qu'elles soient estimées et donc pas forcément exactes contrairement aux données mesurées.

Étant donné que les signaux radar n'ont pas de représentations visuelles dans l'environnement, l'usage des représentations écologiques pour le ROEM semble compromis. Cependant il est possible d'associer les signaux radars à des concepts proches comme des signaux lumineux ou des ondes. En parallèle, les représentations écologiques peuvent servir à représenter des informatisations complémentaires aux données comme le fait qu'elles soient non fiables [103]. Ainsi, les représentations écologiques sont potentiellement applicables au domaine du ROEM avec tous les bénéfices que cela implique, mais nécessitent d'être combinées à d'autres techniques.

### 3.4 Conclusion

Nous avons identifié un certain nombre de solutions existantes répondant à nos problématiques illustrées dans la table 3.1. Si l'ensemble de ces solutions résolvent nos problématiques elles ne sont pas forcément compatibles, de sorte qu'il n'existe pas de solutions effectives à nos problématiques. En parallèle, l'existant n'explique pas de solutions pour certaines problématiques mineures comme les utilisateurs novices. Si nous pouvions identifier pour chaque problématique l'ensemble des représentations qui la résolvent, alors nous pourrions identifier les éléments communs à ces représentations. Ceci nous permettrait d'identifier des solutions pour toutes les problématiques mais aussi d'identifier comment les représentations gèrent plusieurs problématiques et ainsi régler

les problèmes de compatibilité des solutions. Dans le chapitre suivant nous proposons un moyen d'identifier les problématiques que résolvent les représentations.

	quantité de données	de	aspect multidimensionnel	complexité des tâches	faible expertise des utilisateurs
<b>synthèse et détail</b>	●			-	
<b>affichage condensé</b>	●		●	●	
<b>affichage étendu</b>	●				
<b>encodage visuel multiple</b>			● -		
<b>multivue et liaisons</b>	●		●	-	
<b>animation</b>			+	-	+
<b>affiche écologique</b>	+		+		+

TABLE 3.1 – Synthèse des problématiques que résolvent les représentations analysées (● : permet; ● : ne permet pas; + : facilite; - : ne facilite pas)

## Chapitre 4

# Caractérisation des problématiques de représentation

Afin de pouvoir identifier de manière formelle les problématiques que résolvent les représentations existantes, nous cherchons à obtenir une caractérisation de ces problématiques, c'est-à-dire à identifier tous les types de problématiques existantes. Pour cela nous commençons par identifier les différentes catégories de problématiques avant d'identifier toutes les valeurs qu'elles peuvent prendre.

Pour être le plus exhaustif possible, section 1, nous identifions un premier niveau de catégories de manière théorique. Nous analysons le processus de visualisation dont fait partie la représentation afin d'identifier le contexte des représentations. Comme une problématique correspond à un contexte que résout une représentation, nous associons les paramètres du contexte aux catégories de problématiques. Une fois les catégories identifiées nous analysons, pour chacune d'elle, sections 2, 3 et 4, les formes qu'elles peuvent prendre à l'aide de caractérisations existantes. Cela nous permet de mettre au point une caractérisation globale que nous illustrons par une iconographie.

### 4.1 Identification des catégories de problématiques

Pour identifier les catégories de problématiques des représentations nous cherchons les paramètres du contexte des représentations. Pour ce faire, nous nous intéressons au processus dans lequel s'insère la représentation et identifions ses composants. Il s'agit du processus de visualisation et nous cherchons donc les facteurs qui influencent ses composants (en tant que paramètres du contexte). Pour cela nous commençons par décrire les définitions existantes du processus de visualisation. Puis nous proposons une agrégation

de ces définitions dont nous extrayons les facteurs qui influencent leurs composants. Enfin, nous comparons ces facteurs aux paramètres du contexte des représentations définis empiriquement.

#### 4.1.1 Définitions du processus de visualisation

Chen et Jänicke proposent une définition du processus de visualisation issue de la théorie de l'information [32]. Ils décrivent la visualisation comme une série de transformations de l'information entre un système source (Source), d'où sont extraites des données brutes, et un système destination (Destination), qui prend en entrée les connaissances issues de la visualisation (cf. figure 4.1). Parmi les transformations qui constituent ce processus nous distinguons les transformations prédéfinies, correspondant aux étapes de représentation et les autres transformations que sont l'affichage (Viewing), la perception (Perception) et l'interprétation (Cognition). La représentation s'insère donc dans un contexte constitué de ces trois dernières transformations. Chen et Jänicke identifient l'existence de bruits impactant ces processus, nous permettant d'identifier trois facteurs influençant la représentation : le bruit sur l'affichage (ex : type d'écran), le bruit sur la perception (ex : profil utilisateur) et le bruit sur l'interprétation de l'utilisateur (ex : expertise utilisateur). Dans l'idée de décrire uniquement le flux d'information Chen et Jänicke s'abstiennent explicitement de décrire les phénomènes d'interaction. Pourtant, l'interaction est une part non négligeable du processus de visualisation car elle apporte la notion d'exploration et permet d'extraire des informations non identifiées durant la conception.

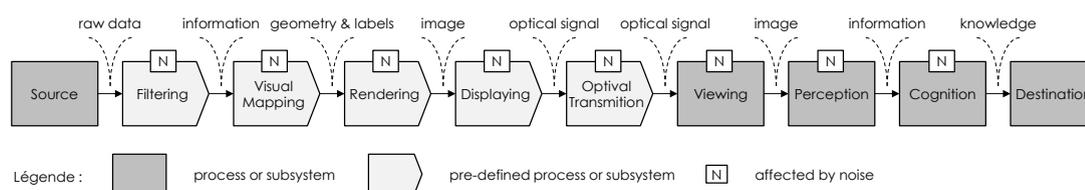


FIGURE 4.1 – Processus de visualisation décrivant le flux d'information de Chen et Jänicke [32]

Van Wijk propose un schéma d'analyse visuelle qui prend en compte l'action de l'utilisateur [93]. Cette définition décrit un premier processus de représentation qui conduit à un processus de perception et de cognition puis à un processus d'acquisition de connaissance (cf. figure 4.2). Le processus d'acquisition induit un processus d'exploration interactive qui conduit à un processus de spécification des besoins bouclant sur le processus de représentation. Ces derniers processus traduisent les actions de l'utilisateur dans le processus de visualisation. En étendant le concept de bruit sur ces processus nous obtenons deux nouveaux facteurs : le bruit sur l'exploration (ex : type d'interacteur) et le bruit sur

la spécification (ex : type de données). Ces différents facteurs s'ajoutent aux facteurs identifiés précédemment sans que nous puissions les définir davantage.

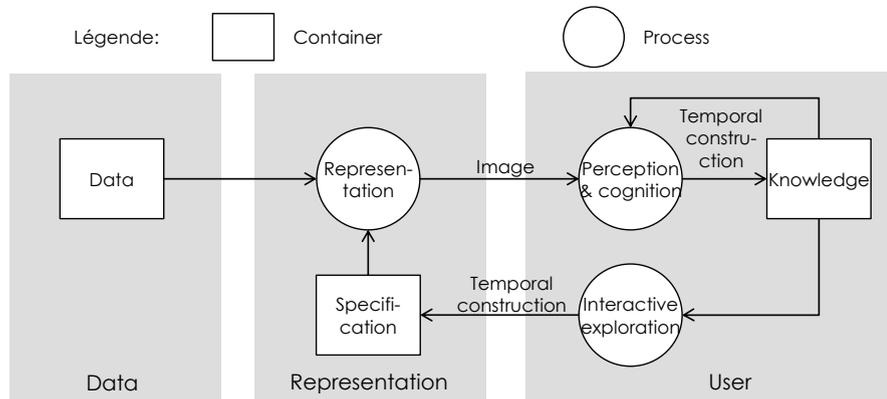


FIGURE 4.2 – Processus de visualisation prenant en compte l'interaction de van Wijk [93]

Vickers et al. proposent un processus dont les composants sont des états d'information plutôt que des transformations [97]. Ce processus contient les états : système (*System*), données brutes (*Data*), données représentées (*Representation*), données interprétées (*Evocation*) et connaissances (*Knowledge*) issues des transformations : mesure (*Measure*), rendu (*Render*), lecture (*Read*) et inférence (*Infer*) (cf. figure 4.3). De plus, Vickers et al. ajoutent trois états supplémentaires que sont le schéma des données (*Schema*), la mise en page (*Layout*) et le questionnement (*Question*) qui correspondent à la généralisation ou l'intention derrière les principaux états du processus (données brutes, données représentées et données interprétées). Ces trois états mettent en avant l'existence de modèles derrière chaque élément du contexte des représentations. Ces modèles ainsi identifiés correspondent, dans une forme plus concrète, aux facteurs qui influencent les représentations et que nous associons jusque-là au bruit.

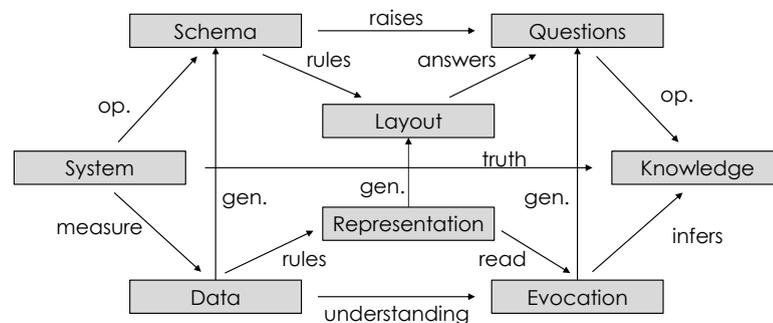


FIGURE 4.3 – Processus de visualisation issu d'un analyse formelle de Vickers et al. [97]

Pour conclure, les différentes définitions du processus de visualisation identifiées n'incluent pas certaines parties du processus comme l'interaction ou ne permettent pas d'identifier de facteurs influençant la représentation. En revanche, elles contiennent toute la matière nécessaire à la définition d'un processus exhaustif identifiant ces facteurs.

### 4.1.2 Proposition d'une définition synthétique

N'ayant pas trouvé de propositions pertinentes pour l'identification de tous les facteurs d'influence des représentations, mais ayant identifié des processus en contenant tous les composants, nous proposons une définition agrégeant les définitions existantes (cf. figure 4.4). Cette nouvelle définition est basée sur le flux d'information de Chen et Jänicke [32], avec les états d'information comme étapes proposées par Vickers et al. [97]. Les facteurs qui ont une incidence sur la représentation sont représentés par une lettre sur les transitions et correspondent aux paramètres qui influencent les représentations.

La première transformation de ce processus est la capture des données. Dans l'activité ROEM, la capture est l'étape d'acquisition des données effectuée par l'intercepteur radar. Cette capture conduit aux données brutes qui dans le cas du ROEM sont des listes d'impulsions ayant un identifiant, une fréquence, une date d'arrivée, etc. Ces données sont ensuite transformées par la représentation pour devenir des données représentées. Actuellement dans le ROEM, les données représentées sont des graphiques 2D. Ces données représentées sont ensuite perçues et interprétées par l'utilisateur. Les données perçues sont un ensemble de spécifications visuelles alors que les données interprétées sont les informations extraites de ces spécifications visuelles comme la détection d'une zone de forte densité. Ces données sont ensuite utilisées de sorte à fournir de la connaissance. Pour le ROEM la connaissance liée à une forte densité serait la présence de données ayant des valeurs similaires et donc d'un signal radar.

Vis-à-vis des facteurs qui influencent la représentation, dans un cas fictif d'analyse de données météorologiques, la capture pourrait donner une valeur de température. La différence de capture du point de vue de la visualisation entre le ROEM et la météorologie se situerait donc au niveau du type de données fourni. Cette différence de capture influencerait forcément la représentation qui fait partie du processus de visualisation, nous permettant de conclure que le type de données correspond à un facteur qui influence la représentation. Si nous étendons cette recherche de facteurs à toutes les transformations externes à la représentation, nous obtenons les facteurs : contexte d'utilisation (pour la perception et l'interprétation) et besoin (pour l'usage).

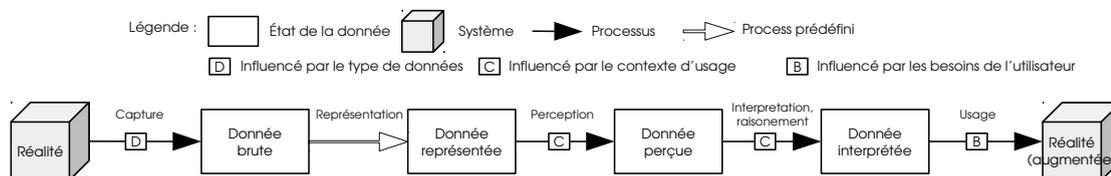


FIGURE 4.4 – Première version du processus de visualisation synthétique permettant d'identifier trois types de facteurs influençant la visualisation

Les données brutes sont rarement utilisées telles quelles (cf. figure 4.5a). Elles passent souvent par une première étape de traitement avant d'être représentées. Par exemple, la visualisation d'une distribution de population est souvent basée sur la densité et non sur l'emplacement exact des personnes. Cette étape de traitement modifie potentiellement la manière dont les données seront représentées et, en tant que telle, doit être intégrée au processus proposé. Nous considérons donc un état supplémentaire entre les données brutes et les données représentées, correspondant aux données traitées. La transition de traitement fait le lien entre les données brutes et les données traitées, et la transition de représentation fait le lien entre les données traitées et les données représentées (cf. figure 4.5b).

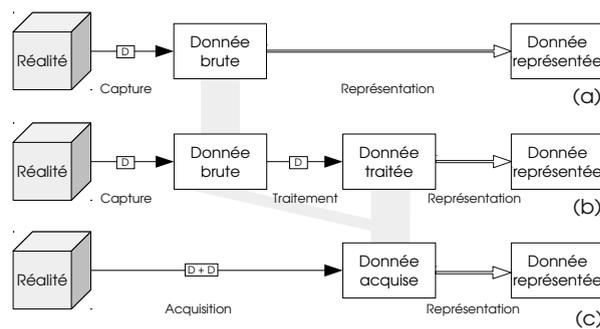


FIGURE 4.5 – Détail du processus de visualisation de la réalité à la donnée représentée (a) initial, (b) après la prise en compte de la transformation de traitement et (c) après la synthèse des transformations de capture et de traitement

Il faut également noter que le processus de traitement est distinct du processus de transformation de données qui fait partie du processus de représentation [29]. La transition de traitement, comme la transition de capture, dépend du type de données. Nous pouvons donc élargir la typologie des données afin d'inclure le traitement des données et regrouper les transitions de capture et de traitement en une seule transition qui dépend du type de données et produit des données acquises (cf. figure 4.5c).

Comme van Wijk l'identifie dans sa définition de processus de visualisation [93], nous incluons l'interaction dans notre processus (cf. figure 4.6). Comme Chen et Jänicke [32] l'identifient en omettant l'interaction dans le flux d'information, l'interaction n'a pas d'impact direct sur les états de l'information mais impacte la transformation de représentation [75]. Le seul cas où les interactions ont un impact direct sur les états de la visualisation est lorsqu'elles produisent de nouvelles informations. Pour illustrer cela nous ajoutons la transformation de production à notre processus. Enfin, les transformations d'interaction (action et production) comme les autres transformations liées aux utilisateurs (perception et cognition) sont influencées par le contexte d'utilisation.

En ce qui concerne le ROEM, les besoins de l'utilisateur sont rarement satisfaits à l'aide d'une représentation statique. L'opérateur est amené à modifier la vue ou l'agencement

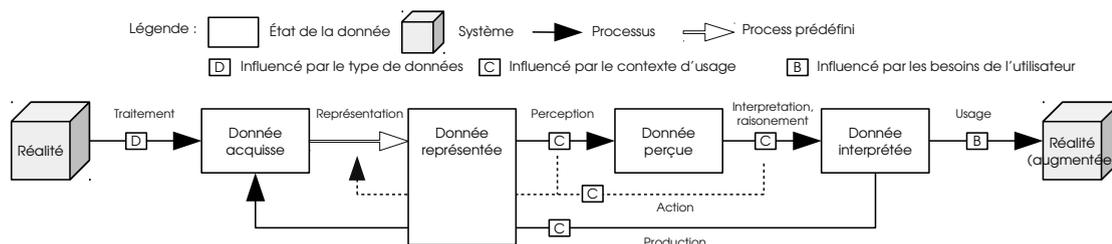


FIGURE 4.6 – Processus de visualisation synthétique prenant en compte l’interaction et permettant d’identifier trois facteurs qui influencent la visualisation

de données pour palier à des problèmes de perception ou d’interprétation. Par exemple, l’opérateur peut constater que le niveau de zoom ne lui permet pas de distinguer les données (cf. figure 4.7). Dans ces conditions, l’opérateur souhaitera modifier le niveau de zoom ou la vue pour une meilleure perception ou une meilleure interprétation. Cela illustre une interaction initiée par la perception impactant la représentation.

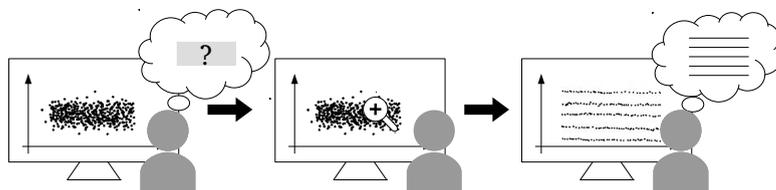


FIGURE 4.7 – Illustration de l’usage du zoom pour améliorer l’interprétation

L’activité du ROEM peut aussi nécessiter une production, comme la création de groupes de données après l’identification d’un radar ou l’insertion d’impulsions pour combler un signal dégradé (cf. figure 4.8). Cette production ajoute de nouvelles informations (acquises) qui passeront aussi par le processus de représentation.

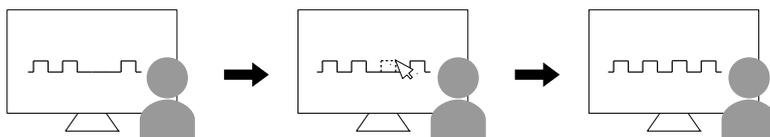


FIGURE 4.8 – Illustration de l’usage de l’interaction pour insérer une impulsion dans le signal

Pour conclure, nous avons construit une définition du processus de visualisation en fonction des définitions existantes. Cela nous a permis d’analyser le processus de visualisation et d’identifier le contexte des représentations. Grâce à cela, nous avons appréhendé les éléments qui influencent ces étapes, ce qui nous permet de définir des catégories de problématiques de la représentation. Nous identifions trois catégories : le type de données, le contexte d’utilisation et les besoins des utilisateurs. Enfin, bien que conçue à des fins d’extraction des éléments influençant la visualisation, cette nouvelle définition du processus de visualisation est fonctionnelle et est même compatible avec le *pipeline de*

*l'infoVis* qui décrit la représentation [29]. Ce processus permet donc d'identifier les paramètres du contexte de représentation et synthétise de manière cohérente les processus de représentations existants.

### 4.1.3 Confrontation aux études empiriques

Pour s'assurer que notre proposition de facteurs influençant la visualisation est compatible avec l'existant nous la comparons à des études empiriques. Pfitzner et al. identifient cinq paramètres impactant la représentation : l'expertise de l'utilisateur, le contexte (expérience de l'utilisateur, historique, intention, besoins et périphériques), le type de tâche, le type de données et l'interaction [75] (cf. figure 4.9).

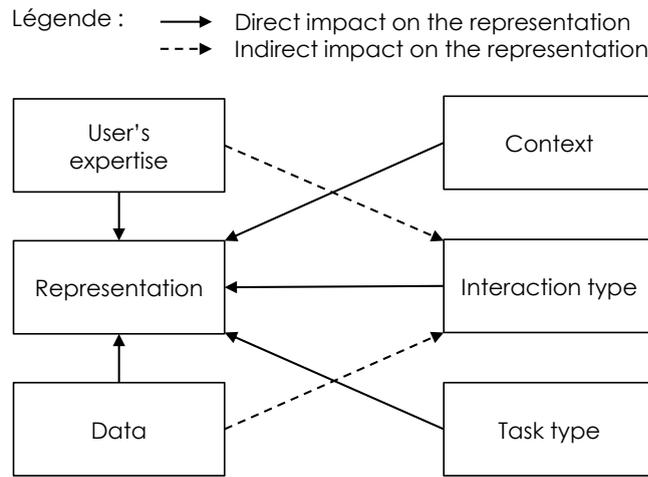


FIGURE 4.9 – Facteurs influençant la visualisation d'après Pfitzner et al. [75]

Si l'on découpe le contexte d'usage identifié par notre proposition selon la description de Thévenin et Coutaz [87], qui énonce que le contexte d'usage est composé de l'expertise de l'utilisateur, de la plateforme et de l'environnement, nous retrouvons dans notre proposition tous les éléments identifiés dans la proposition de Pfitzner et al. à l'exception du type d'interaction que nous considérons interne à la représentation (cf. figure 4.10). Cette comparaison nous conforte dans l'utilisation de notre proposition de paramètres uniquement issue de propositions théoriques.

### 4.1.4 Synthèse

Nous avons analysé les définitions existantes du processus de visualisation et les avons synthétisées dans un processus permettant d'identifier les paramètres du contexte que nous associons aux catégories de problématiques de la représentation. À l'aide de notre définition du processus de visualisation nous avons extrait trois paramètres que nous

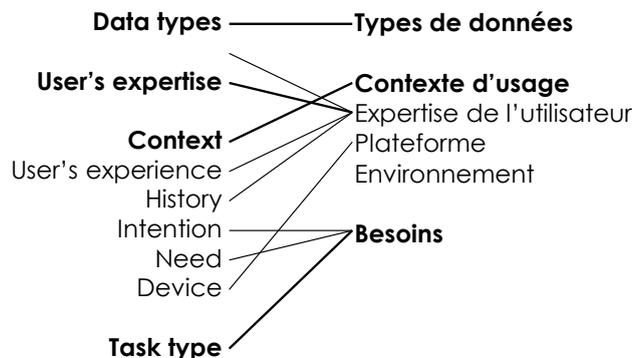


FIGURE 4.10 – Comparaison entre les facteurs de Pfizner et al. et notre proposition validant sa conformité à l'existant

avons confrontés avec succès aux définitions empiriques. Ces paramètres sont : le **type de données**, le **contexte d'usage** et les **besoins de l'utilisateur** (tâches). Nous cherchons donc maintenant à identifier les différentes valeurs que peuvent prendre ces catégories.

## 4.2 Catégorie : Type de données

Ayant identifié le type de données comme une catégorie de problématique, nous cherchons maintenant à identifier les valeurs qu'il peut prendre. À l'aide de caractérisations des données existantes nous identifions les différents types de données existants et en extrayons une description des différentes problématiques liées au type de données. Nous analysons ainsi les volumes des données, l'organisation des données, les propriétés des attributs, la nature des attributs, la temporalité des données et leur dimension.

### 4.2.1 Volume des données

L'amélioration des moyens d'acquisition et de stockage des données a entraîné une forte croissance des volumes de données. Face à ces volumes, les représentations existantes ont dû gérer des problématiques perceptives et cognitives liées à la surcharge des affichages. Nous cherchons ainsi à définir les quantités de données ayant un impact sur la représentation en commençant par identifier la limite de volume au-delà de laquelle les données ne sont plus perceptibles et donc au-delà de laquelle la représentation nécessite d'être adaptée.

Pour pouvoir distinguer deux éléments la distance angulaire de l'œil aux éléments doit être de 1 arc minute (1') soit 1/60 degrés [56]. Le nombre maximal d'éléments perceptibles dépend donc du champ de vision offert par l'affichage. Par exemple, un affichage permettant un champ de vision de 20° x 20° peut contenir au plus 14 400 000 éléments

distinguable (angle horizontal en degré x nombre d'arcs minute dans un angle en degré x angle vertical en degré x nombre d'arcs minute dans un angle en degré). Afin d'obtenir une limite chiffrée du volume de données ne permettant pas un affichage simultané de toutes les données, nous avons calculé le champ de vision et le nombre d'éléments distinguables de différents types d'affichages (cf. tableau 4.1). Pour chaque affichage nous avons estimé le champ de vision qu'il permettait en se basant sur une utilisation fixe<sup>1</sup>. Pour les dispositifs de type écran nous sommes basés sur leur taille standard et la distance standard de l'utilisateur à l'affichage alors que pour les dispositifs immersifs nous avons considéré que les utilisateurs avaient accès à tout le champ de vision (en stéradian). Nous avons ensuite extrapolé le nombre d'éléments distinguables d'après les champs de vision identifiées. Pour les écrans nous avons déterminé la quantité de surface de taille 1' x 1' par champ de vision et pour les dispositifs immersifs nous sommes plutôt basés sur le nombre de disques ayant un rayon égal à 1' (pour pouvoir faire la conversion en stéradian qui est l'unité dans laquelle nous avons décrit les champs de visions).

TABLE 4.1 – Volumes de données maximaux perceptibles selon différents dispositifs

affichage	champ visuel	éléments distinguables
écran	50° x 30° (à 70 cm)	5 400 000
mur d'écran (6 x 2 m)	90° x 37° (à 3 m)	11 988 000
dispositif immersif	4 $\pi$ sr	39 204 000

Le premier constat issu de ces calculs est que s'il semble exister une limite de volume en termes d'affichage, cette dernière est très dépendante du dispositif. De plus, bien que dans les prochaines années la technologie devrait permettre de créer des affichages ayant autant de pixels que d'éléments distinguables, ce n'est actuellement pas le cas. Par exemple, un écran standard (*full HD*) contient en moyenne 2 millions de pixels alors que nous avons identifié qu'un utilisateur peut distinguer plus de 5 millions d'éléments sur un tel dispositif. La limite d'éléments distinguables est donc actuellement bornée par le nombre de pixels que possèdent les dispositifs les plus courants. Enfin, cette limite perceptive est supplantée par une limite cognitive difficilement définissable. Nous nous contentons donc d'identifier l'existence d'une limite haute sans pouvoir la chiffrer. Vis-à-vis d'une limite basse, la limite maximale d'objets identifiables de manière pré-attentive est de quatre [35]. Une représentation contenant moins de cinq objets ne nécessitera donc pas certaines précautions facilitant la perception. Nous identifions ainsi trois types de données liés au volume : un volume faible, un volume moyen et un volume important (cf. figure 4.11).

1. Nous considérons le mouvement sur certains dispositifs comme une interaction or l'interaction est une technique de représentations et ne doit donc pas influencer la définition des problématiques. Nous faisons exception des rotations de la tête qui, dans le cas d'un casque immersif, sont juste des moyens d'accéder à l'ensemble de l'affichage.



FIGURE 4.11 – Icônes représentant les trois types de volume de données : petit volume, volume moyen et gros volume

## 4.2.2 Organisation des données

Hascoët et Beaudouin-Lafon identifient l'organisation des données comme influençant la représentation [48]. Ils découpent l'organisation des données en quatre types : les listes, les arbres, les graphes et les données liées par un indice de similarité, également appelées modèles vectoriels.

Une liste correspond à un ensemble ordonné d'éléments, comme des mots dans un texte. Cependant, cet aspect ordonné ne relève pas de l'organisation globale des données car il est intrinsèque aux attributs d'un élément. Par exemple un mot peut être ordonné par sa position dans un texte ou par son nombre de lettres sans que cela remette en question son organisation globale. Si l'aspect ordonné influence bien la représentation (cf. section 4.2.3) il n'est donc pas considéré comme du ressort de l'organisation. Les données de type listes sont donc considérées comme des données non structurées en terme d'organisation.

Un arbre est défini par des relations hiérarchiques entre ses données. Par exemple les chapitres et sections d'un document ont des relations hiérarchiques. À la différence des listes, la relation entre deux éléments d'un arbre n'est pas intrinsèque à un attribut mais contribue à la structure de l'ensemble des données. Ainsi les arbres, contrairement aux listes, sont structurés.

Les graphes correspondent à des arbres dont les relations ne sont pas hiérarchiques. Par exemple un réseau routier peut être modélisé par un graphe car il met en relation des lieux sans pour autant qu'ils aient une relation hiérarchique. Les relations de structures se divisent en deux catégories : les relations orientées et les relations non orientées. Par exemple un réseau routier contient des voies à sens unique (relation orientée) alors que dans un réseau informatique les connexions n'ont pas forcément de sens (relation non orientée). Cela illustre une différence au sein des données structurées : celles structurées d'après des relations orientées et celles structurées d'après des relations non orientées.

Enfin, Hascoët et Beaudouin-Lafon décrivent les données structurées par un critère de similarité comme des données pour lesquelles les similitudes peuvent être quantifiées. Par exemple, un ensemble d'exercices notés sera quantifiable à l'aide des notes. Cette relation est, comme pour les listes, spécifique aux attributs, car nous pouvons considérer la valeur de la note comme l'un des attributs des exercices.

Ainsi, parmi les quatre types de données explicités par Hascoët et Beaudouin-Lafon, deux sont basés sur des relations entre attributs et correspondent à des données non structurées : les listes et les modèles vectoriels. Les arbres correspondent à un cas spécifique de données structurées par une relation orientée, tandis que les graphes correspondent à des structures pouvant être orientées ou non orientées. Nous identifions ainsi trois types de données liés à l'organisation : **non structurées**, **structurées par une relation non orientée** et **structurées par une relation orientée** (cf. figure 4.12).



FIGURE 4.12 – Icônes représentant les différents types d'organisations des données : non structurées, structurées de manière non orientée et structurées de manière orientée

### 4.2.3 Propriétés des attributs

Bertin et de nombreux auteurs après lui identifient une corrélation entre les propriétés des attributs et les variables visuelles à utiliser pour les représenter [15, 68, 73, 101]. Cela illustre l'influence des propriétés des attributs sur les représentations et en fait donc une problématique des représentations. Les travaux sur les propriétés perceptives s'accordent à définir trois types de propriétés : nominal, ordinal et quantitatif. Un attribut est **nominal** lorsque ses valeurs sont qualitatives et non ordonnées, comme les noms d'animaux. La relation entre deux données en fonction de leurs attributs nominaux est basée sur la similarité ou la différence. Un attribut est **ordinal** lorsque ses valeurs sont qualitatives et ordonnées, comme les lettres de l'alphabet. Les données ayant des attributs ordonnés peuvent être distinguées en fonction d'un ordre. Enfin, un attribut est **quantitatif** lorsque ses valeurs sont quantitatives, comme la température et de nombreux attributs ayant des valeurs numériques. Ces trois types d'attributs nous permettent de détailler davantage les problématiques de représentations et font échos aux relations identifiées lors de la caractérisation de l'organisation. Nous ajoutons ainsi à notre caractérisation trois types de données liés aux propriétés des attributs : ayant un **attribut nominal**, ayant un **attribut ordinal** et ayant un **attribut quantitatif** (cf. figure 4.13).



FIGURE 4.13 – Icônes représentant les différents types de propriétés des attributs : nominale, ordinale et quantitative

#### 4.2.4 Nature des attributs

Dans un graphique 2D, le choix de mettre un attribut en abscisse et l'autre en ordonnée n'est pas anodin, les représentations varient selon qu'elles représentent des attributs caractéristiques ou référentiels [77]. Un attribut caractéristique est un attribut correspondant à une propriété mesurée ou observée (ex : la température), alors qu'un attribut référentiel est un attribut reflétant un aspect du contexte dans lequel la mesure a été effectuée (par exemple, l'heure). Dans un jeu de données l'ensemble des attributs référentiels forme une combinaison de valeurs uniques pour chaque donnée. Les attributs spatiaux et temporels sont ainsi souvent considérés comme référentiels. Nous identifions donc deux types de données liés à la nature des attributs : ayant des **attributs caractéristiques** et ayant des **attributs référentiels** (cf. figure 4.14).



FIGURE 4.14 – Icônes représentant les différents types de natures des attributs : caractéristique et référentielle

#### 4.2.5 Temporalité des données

Le temps, de par ses nombreuses spécificités, a toujours eu une place à part dans la représentation. Il est parfois représenté en fonction de ses caractéristiques de manière circulaire, linéaire ou séquentielle. Aigner et al. proposent une classification des données temporelles basée sur trois aspects : le temps linéaire ou cyclique, les événements ponctuels ou les événements séquentiels et le temps ordonné ou le temps ramifié ou temps avec des perspectives multiples [4]. Brehmer et al. proposent une caractérisation encore plus détaillée uniquement vis-à-vis des *timelines*, une catégorie de données temporelles [21].

Ces différentes caractérisations illustrent la complexité que représente la caractérisation des données temporelles. Pour autant les caractéristiques associées au temps ne lui sont pas forcément spécifiques. Par exemple, l'aspect linéaire du temps n'est qu'un cas particulier de donnée ordinaire ou quantitative. Quant à l'aspect cyclique, le temps n'est cyclique que sous forme tronquée (une date ramenée au mois est cyclique mais uniquement si l'on fait abstraction de l'année) et il existe d'autres attributs que l'on peut identifier comme cycliques (ex : une latitude). Nous nous contentons donc de considérer le temps comme un attribut quelconque.

#### 4.2.6 Dimension des données

Shneiderman classe les données représentées en sept catégories : les données unidimensionnelles, les données bidimensionnelles, les données tridimensionnelles, les données temporelles, les données multidimensionnelles, les arbres et les graphes [83]. À travers cette classification il identifie donc quatre types de données liés à la dimension. Les données unidimensionnelles sont assimilées à des données linéaires, comme le sont les documents textuels. Les données bidimensionnelles correspondent à des données planaires ou cartographiques, comme les cartes géographiques ou les mises en page de journaux. Les données tridimensionnelles correspondent à des objets du monde réel, tels que des objets en trois dimensions. Et enfin, les données multidimensionnelles correspondent à la plupart des bases de données relationnelles et statistiques dans lesquelles les éléments contiennent une multitude d'attributs.

Contrairement à leur dénomination, ces catégories ne semblent pas être définies par le nombre d'attributs que contiennent les données. Par exemple chaque mot d'un document textuel peut être défini par son sens, son nombre de lettres, ou encore sa position en fonction de l'ordre alphabétique, ce qui fait au moins trois attributs pour une donnée unidimensionnelle. À l'exception des données multidimensionnelles, les catégories de Shneiderman semblent plus liées au nombre de dimensions spatiales, c'est-à-dire au nombre d'attributs spatiaux, qu'au nombre total d'attributs. L'usage préférentiel de la 3D pour les données ayant trois dimensions spatiales et non pour les données abstraites ayant plus de trois attributs en est un exemple [50]. Mais si ce découpage a du sens, nous pensons qu'il ne concerne pas uniquement les attributs spatiaux. Nous cherchons donc à étendre cette classification, non plus seulement aux attributs spatiaux, mais également à tous les attributs référentiels. Nous avons identifié précédemment que les attributs spatiaux, comme les attributs temporels, sont souvent des attributs référentiels. Nous nous demandons donc si l'impact des attributs spatiaux sur les représentations ne viendrait pas de leur aspect référentiel. La caractéristique des attributs référentiels est qu'ils identifient de manière unique chaque donnée. Ainsi, les attributs référentiels d'une donnée nécessitent d'être tous exprimés pour éviter les occlusions et c'est bien cette même raison qui guide la conception de solutions en fonction du nombre d'attributs spatiaux. Nous identifions ainsi une classification des données en fonction de leur dimension, liée au concept générique de d'attributs référentiels. Cela nous permet d'identifier quatre types de problématiques liées à la dimension : **unidimensionnel**, **bidimensionnel**, **tridimensionnel** et **multidimensionnel** (cf. figure 4.15).



FIGURE 4.15 – Icônes représentant les différents types de dimensions des attributs : unidimensionnel, bidimensionnel, tridimensionnel et multidimensionnel

#### 4.2.7 Synthèse

À l'aide des caractérisations existantes nous avons défini des catégories de types de données nous permettant de décrire les problématiques de représentation liées au type de données. Une donnée à représenter est définie en premier lieu par son volume qui peut être faible, moyen ou important. Les données sont aussi définies par leur structure. Un groupe de données peut être non structuré, structuré d'après des relations non orientées ou structuré d'après des relations orientées. Chaque donnée contient un certain nombre d'attributs ayant des caractéristiques propres. Les attributs peuvent avoir une propriété qui est ordinale, nominale ou quantitative et une nature qui est référentielle ou caractéristique. Enfin les données sont définies en fonction de leur dimension qui peut être : unidimensionnelle, bidimensionnelle, tridimensionnelle et multidimensionnelle.

Si nous utilisons cette description pour identifier les problématiques de représentation du ROEM liées au type de données nous obtenons les problématiques suivantes : gros volume de données, données non structurées, données multidimensionnelles, attributs quantitatifs et attributs référentiels ou caractéristiques (cf. figure 4.16).



FIGURE 4.16 – Problématiques de représentation du ROEM liées au type de données identifiées à l'aide de notre caractérisation

L'identification des problématiques de représentation liées au type de données correspond à une première caractérisation des problématiques de représentation. Elle nécessite cependant d'être complétée par les types de besoins et les types de contexte d'utilisation.

### 4.3 Catégorie : Besoins de l'utilisateur

Nous cherchons à identifier les besoins de visualisation pour décrire les problématiques de représentations. En visualisation ces besoins sont exprimés par des tâches et leur définition est l'objet de recherches en taxonomies de tâches. Or, ces taxonomies sont nombreuses et ont des fonctionnalités diverses (description des actions des utilisateurs, description de l'activité, etc.). Nous commençons donc par définir nos attentes vis-à-vis des taxonomies existantes puis nous extrayons une taxonomie synthétique de l'existant correspondant à nos attentes.

#### 4.3.1 Attentes vis-à-vis des taxonomies des tâches

Nous analysons différentes taxonomies existantes pour pouvoir identifier le type de taxonomie que nous recherchons sachant que nous voulons décrire précisément les besoins de visualisation sans pour autant descendre dans la description de solutions.

Sedig et al. proposent deux taxonomies de niveaux différents : des tâches et des fonctions d'interaction<sup>2</sup> [82]. Il définit une tâche comme une volonté découlant d'un but et une fonction d'interaction comme une action ou une perception. Cette distinction nous permet de mieux définir le type de taxonomie que nous cherchons. Nous cherchons à déterminer les objectifs de l'utilisateur et ceci indépendamment des outils de représentations et donc des actions et des perceptions qu'ils induisent.

À l'inverse, Hascoët et Beaudouin-Lafon décrivent des tâches de très haut niveau [48]. Ils identifient quatre tâches vis-à-vis de la recherche de données : l'exploration rapide d'ensembles d'informations inconnues ; la mise en évidence de relations et de structures dans les informations ; la mise en évidence de chemins d'accès à des informations pertinentes ; et la classification interactive des informations. Bien que spécifiques au domaine de la recherche de données, ces tâches englobant une grande quantité de besoins établissent l'existence de taxonomies de plus haut niveau. À ce propos, Munzner définit différents niveaux d'abstraction permettant de définir les besoins d'une visualisation : les problématiques du domaine (*domain problem*), les données/opérations abstraites (*data/operation abstraction*), les techniques d'encodage et d'interaction (*encoding/interaction technique*) et les algorithmes (*algorithm*) [71]. Dans notre cas nous cherchons à catégoriser les besoins et non les problématiques, nous ne descendons donc pas jusqu'au niveau des techniques d'encodage ou d'interaction. En revanche nous cherchons à descendre à un niveau de

---

2. Le terme « interaction » couvre ici tous les flux d'informations échangés entre l'humain et l'ordinateur et, en tant que tel, comprend la visualisation (ordinateur à l'homme) et l'interaction (humain à ordinateur).

détail commun à toutes les représentations donc notre description est au niveau des opérations abstraites.

Valiati définit des tâches d'analyse, cognitives ou opérationnelle [91]. Alors que les tâches cognitives sont internes à l'utilisateur et les tâches opérationnelles interne au système, les tâches d'analyse sont définies comme des tâches de plus haut niveau, pouvant contenir les tâches cognitives et opérationnelles et définissant les buts de l'utilisateur face au système. Ce dernier type de tâche semble donc correspondre à nos besoins en termes de position par rapport à l'humain et au système et en termes de niveau d'abstraction par rapport aux tâches fonctionnelles de plus bas niveaux.

Enfin, certaines taxonomies récentes identifient des taxonomies plus complexes permettant de décrire intégralement les problématiques de représentations directement par les besoins. Les travaux de Brehmer et Munzner proposent une caractérisation des tâches sur plusieurs niveaux d'abstraction (de la tâche à l'interaction) permettant de décrire les problématiques que résolvent les représentations [22]. Schulz et al. s'intéressent aussi à la description de tâches qu'ils associent à des données leur permettant d'utiliser leur caractérisation des problématiques pour recommander la conception de représentations [81]. Nous considérons ces démarches comme un autre moyen de parvenir à nos fins que celui emprunté dans ces travaux car nous décrivons indépendamment les problématiques de représentation que sont le type de données et le contexte d'usage. Nous considérons donc ces travaux comme des travaux auxquels se comparer et non sur lesquels se baser.

Pour conclure, d'après des taxonomies de différents niveaux d'abstraction et d'après différentes définitions de niveaux d'abstraction nous avons pu définir le niveau des tâches permettant d'explicitier les besoins de visualisation. Les tâches doivent être les plus précises possibles sans pour autant décrire des solutions. Les tâches doivent décrire un but de l'utilisateur vis-à-vis du système sans concerner uniquement le système ou l'utilisateur.

### 4.3.2 Construction d'une taxonomie à partir de l'existant

Nous analysons les taxonomies des tâches existantes d'après les critères identifiés précédemment, c'est-à-dire les tâches les plus précises possibles illustrant une problématique (et non une solution) et ayant le même niveau d'abstraction. Au cours de l'analyse nous identifions un ensemble de tâches correspondant à ces critères afin de construire une taxonomie synthétique correspondant à nos besoins.

La taxonomie de Shneiderman est l'une des premières et des plus utilisées. Elle contient les tâches : visualiser l'ensemble (*Overview*), zoomer (*Zoom*), filtrer (*Filter*), accéder aux détails à la demande (*Detail-on-demand*), mettre en relation (*Relate*), accéder à

l'historique (*History*) et extraire (*Extract*) [83]. Certaines tâches semblent plus proches de la description de la solution que du besoin. Par exemple, la tâche « filtrer » permet d'accéder à des informations à l'aide d'un critère. Le besoin est donc plutôt d'accéder à l'information et le filtrage correspond à l'action nécessaire pour le réaliser. Si l'on cherche les besoins derrière chaque tâche de la taxonomie de Shneiderman on identifie trois besoins : identifier des valeurs, accéder aux informations et associer. L'identification des valeurs peut se faire par zoom, par extraction ou par accès aux détails. L'accès aux informations peut se faire en filtrant, en visualisant l'ensemble des données ou en accédant à l'historique. Enfin l'association peut se faire par la mise en relation. Cette première taxonomie nous permet donc d'identifier trois tâches du besoin : **identifier des valeurs**, **accéder aux informations** et **associer** (cf. figure 4.17).

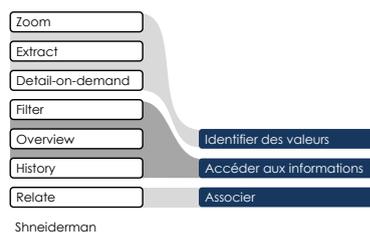


FIGURE 4.17 – Première étape de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes

Wehrend et Lewis proposent une taxonomie qui a la particularité d'être empirique et provient d'une étude qui analyse plus de 90 visualisations [99]. Cette taxonomie, popularisée par Keller, comprend les tâches : identifier (*Identify*), catégoriser (*Categorize*), localiser (*Locate*), trier (*Rank*), comparer (*Compare*), identifier une distribution (*Distribute*), distinguer (*Distinguish*), grouper (*Cluster*), associer (*Associate*) et corrélérer (*Correlate*) [61]. Bien qu'elle date de 1990 cette taxonomie couvre un grand nombre des besoins actuels. Parmi ses tâches nous retrouvons les tâches identifiées précédemment d'identification (identifier et catégoriser), d'accès aux informations (localiser) et d'association (grouper et associer). Cette taxonomie nous permet aussi d'identifier cinq tâches supplémentaires : les tâches **trier**, **comparer**, **identifier une distribution**, **distinguer** et **corrélérer** (cf. figure 4.18).

La taxonomie de Keller est utilisée par Ward qui redéfinit brièvement les tâches pour lesquelles la définition initiale est ambiguë. Ward décrit les tâches suivantes : identifier la caractéristique (*Identify data characteristics*), catégoriser ou classifier (*Categorize or classify*), localiser les limites, les points critiques, les autres fonctionnalités (*Locate boundaries, critical point, features*), trier selon un ordre (*Rank based on some order*), comparer pour trouver des similitudes et des différences (*Compare to find similarities and differences*), distinguer les régions de différentes caractéristiques (*Distinguish regions of different characteristics*), mettre en relation (*Associate into relation*) et corrélérer

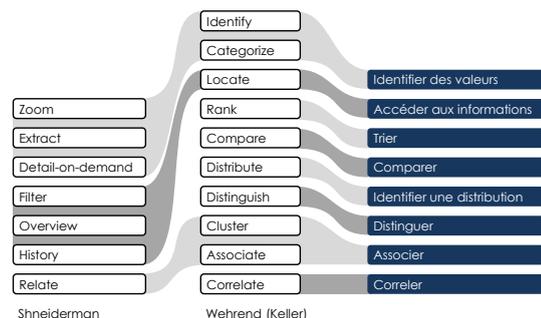


FIGURE 4.18 – Deuxième étape de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes

en classant (*Correlate by classifying*) [77]. Il convient de noter que Ward n'inclut pas les tâches « grouper » et « identifier une distribution » de la taxonomie de Keller. La tâche « grouper » semble couverte par la tâche « mettre en relation » mais rien n'explique la disparition de la tâche « identifier une distribution ». Hormis l'absence de cette dernière tâche, les précisions apportées par la taxonomie de Ward consolide les différentes tâches identifiées (cf. figure 4.19).

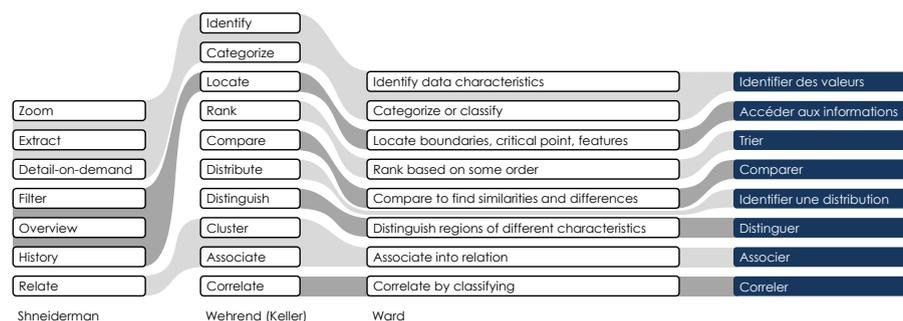


FIGURE 4.19 – Troisième étape de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes

Amar propose une taxonomie empirique plus récente. Elle comprend les tâches : extraire une valeur (*Retrieve value*), filtrer (*Filter*), trier (*Sort*), déterminer l'écart (*Determine range*), caractériser une distribution (*Characterize distribution*), trouver un extremum (*Find extremum*), trouver des anomalies (*Find anomalies*), grouper (*Cluster*), corrélérer (*Correlate*) et calculer une valeur dérivée (*Compute derived value*) [7]. On retrouve dans cette taxonomie toutes les tâches identifiées précédemment : identifier (extraire une valeur), accéder aux informations (filtrer, tirer, comparer (déterminer l'écart), identifier une distribution (caractériser une distribution), associer (grouper) et corrélérer. À cela s'ajoute une dernière tâche, « calcul de valeur dérivée », présente dans aucune autre taxonomie. Nous interprétons cette tâche comme le besoin de créer de l'information qui, étant relatif à l'interaction, est souvent éludé des descriptions. Nous identifions ainsi une dernière tâche de **création d'information** (cf. figure 4.20).

Pour conclure, les taxonomies existantes nous permettent d'identifier neuf tâches correspondant aux besoins de représentation, approfondissant ainsi la description des problématiques de représentations.

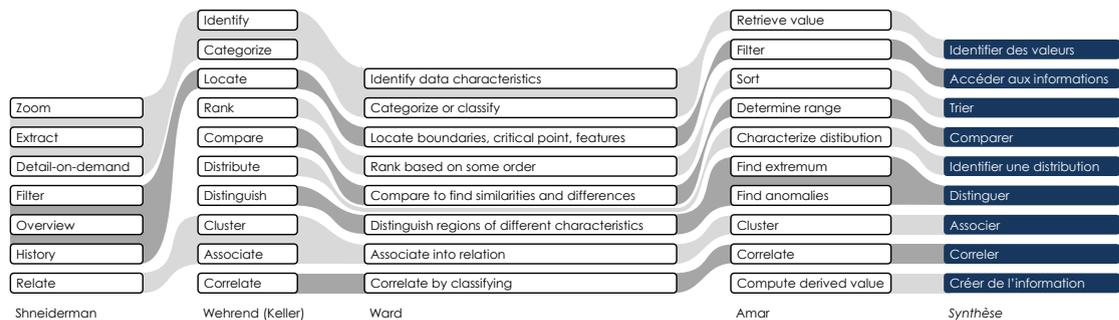


FIGURE 4.20 – Étape finale de la construction la taxonomie proposée à l'aide des taxonomies existantes

### 4.3.3 Présentation d'une taxonomie synthétique

Afin de clarifier la signification de chaque tâche identifiée précédemment nous les décrivons une à une en utilisant des exemples du ROEM :

- **Identifier des valeurs**, signifie identifier les valeurs des attributs d'une ou de plusieurs données (cf. figure 4.21), *ex* : Identifier la valeur en DI d'une impulsion ou la valeur moyenne de fréquence d'un ensemble d'impulsions.

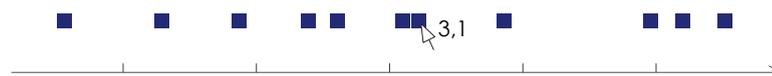


FIGURE 4.21 – Représentation permettant la tâche d'identification de valeur en proposant l'accès à la valeur d'une donnée par un survol de la souris

- **Accéder aux informations**, signifie accéder à une ou plusieurs informations en fonction de critères de type valeurs, structure, etc. (cf. figure 4.22), *ex* : Accéder aux impulsions ayant des valeurs de fréquence entre 2 et 3 GHz.

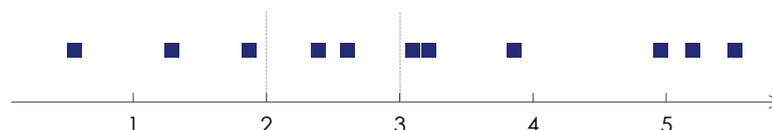


FIGURE 4.22 – Représentation permettant la tâche d'accès aux informations en identifiant les données dont les valeurs sont comprises entre 2 et 3

- **Trier**, signifie appréhender l'ordre d'un ensemble de données ou identifier le classement d'une donnée parmi d'autres données (cf. figure 4.23), *ex : Déterminer la gamme de fréquence qui contient le plus d'impulsions.*



FIGURE 4.23 – Représentation illustrant la tâche de tri en permettant d'identifier que l'avant-dernière donnée à droite a une valeur supérieure à celle des autres données

- **Comparer**, signifie évaluer quantitativement la différence entre deux données (cf. figure 4.24), *ex : Quantifier la différence de DI de deux impulsions.*



FIGURE 4.24 – Représentation illustrant la tâche de comparaison en permettant d'identifier que la donnée sur la droite a une valeur un tiers plus importante que la donnée à gauche

- **Identifier une distribution**, signifie identifier la distribution d'un attribut sur l'ensemble ou un sous-ensemble des données (cf. figure 4.25), *ex : Identifier la distribution d'une émission radar en termes de direction d'arrivée.*



FIGURE 4.25 – Représentation illustrant la tâche d'identification d'une distribution en permettant d'identifier que les données sont distribuées autour de deux valeurs

- **Distinguer**, signifie détecter des singularités (cf. figure 4.26), *ex : Identifier une fenêtre temporelle ayant une forte densité d'impulsions.*



FIGURE 4.26 – Représentation illustrant la tâche de distinction en permettant de distinguer le quatrième carré via un encodage des valeurs en couleur

- **Associer**, signifie identifier un groupe de données en fonction de leurs similarités (cf. figure 4.27), *ex : Identifier un groupe d'impulsions ayant des valeurs de fréquences similaires.*

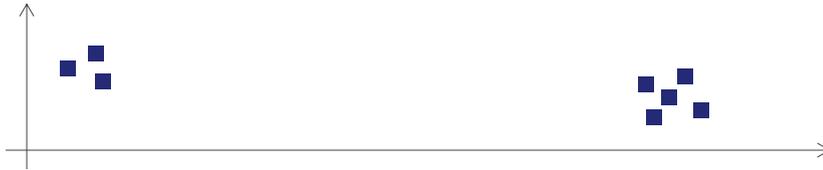


FIGURE 4.27 – Représentation illustrant la tâche d'association en permettant d'associer des données en deux groupes

- **Corréler**, signifie identifier une relation entre des attributs (cf. figure 4.28), *ex : Identifier une corrélation entre les valeurs de DI et de PRI.*



FIGURE 4.28 – Représentation illustrant la tâche de corrélation en permettant d'identifier qu'il existe une corrélation entre la valeur encodant la couleur et celle qui encodant la forme, car tous les carrés sont d'une même couleur et tous les disques sont d'une autre couleur

- **Créer de l'information**, signifie produire une nouvelle information (cf. figure 4.29), *ex : Désigner un groupe d'impulsion comme appartenant au même radar.*

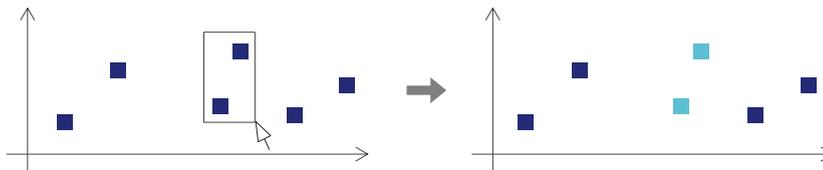


FIGURE 4.29 – Représentation illustrant la tâche de création d'information en permettant de créer un groupe de données

#### 4.3.4 Synthèse

Afin d'identifier les problématiques de représentations définissant les besoins en visualisation de données nous nous sommes intéressé aux taxonomies des tâches de visualisation. Dans un premier temps, nous avons identifié le type de tâches correspondant à la description du besoin puis nous avons décrit ce besoin à l'aide d'une synthèse de taxonomies existantes. Nous avons ainsi proposé une nouvelle taxonomie composée de neuf tâches correspondant aux problématiques des représentations induites par les besoins : **identifier des valeurs**, **accéder aux informations**, **trier**, **comparer**, **identifier une distribution**, **distinguer**, **associer**, **corréler** et **créer des informations**.

## 4.4 Catégorie : Contexte d'usage

Nous cherchons maintenant à identifier les problématiques des représentations liées au contexte d'usage. Le contexte d'usage est défini par Thevenin et Coutaz comme ayant trois dimensions : la plateforme, l'environnement et l'utilisateur [87]. Nous détaillerons donc chaque sous-catégorie pour en extraire les problématiques qu'elle engendre.

### 4.4.1 Plateforme

La plateforme correspond aux dispositifs physiques au travers desquels l'utilisateur visualise les données et avec lesquels l'utilisateur interagit. La plateforme la plus couramment utilisée pour la représentation est un ordinateur possédant un ou plusieurs écrans de taille moyenne (53 cm x 30 cm) et un dispositif d'interaction clavier/souris.

Dans certains contextes, l'interaction clavier/souris est abandonnée en faveur d'écrans tactiles. Ce nouveau mode d'interaction, couplé aux avancées en termes de miniaturisation, a conduit à l'utilisation de dispositifs de plus petite taille (tablettes et smartphones). Ces dispositifs ayant une surface d'affichage amoindrie ne permettent pas le même type de représentation que les écrans standards. Nous distinguons donc deux types de plateformes influençant la représentation : **dispositif de taille standard** et **dispositif de petite taille**.

Les dispositifs tactiles existent également dans des tailles plus grandes, principalement sous forme de tables. La surface de la table élargit l'espace de visualisation et d'interaction et permet l'interaction multi-utilisateur et la collaboration [66]. Certains appareils permettent également de visualiser et d'interagir avec des objets tangibles augmentant l'espace de perception [62]. Dans le même ordre de grandeur (ou plus grand) il existe des murs d'écrans (*walls*). Ces dispositifs sont bien souvent composés de plusieurs écrans mis côte à côte pour former un **écran de très grande taille** de l'ordre de plusieurs mètres [86]. L'interaction avec ces dispositifs est alors déportée et se fait pas le biais de geste ou de manette. La taille d'affichage de ces dispositifs nécessite une représentation adaptée et ils correspondent donc à un troisième type de problématique lié à la plateforme.

Enfin, les représentations peuvent être visualisées à l'aide de **dispositifs immersifs**. Que ces dispositifs soit des casques ou des salles immersives (*CAVE*), ils permettent un champ de vision complet et une perception en trois dimensions grâce aux principes du *motion parallax* et de la stéréoscopie. Ces types d'affichage permettent un champ de vision encore plus grand que précédemment et correspondent ainsi à un quatrième type de plateforme influençant la représentation.

Nous identifions ainsi quatre types de problématiques liés à la plateforme sur laquelle ils sont visualisés : sur des dispositifs de petite taille (tablettes, smartphones, etc.), sur des écrans standards, sur des murs d'écrans et sur des dispositifs immersifs (cf. figure 4.30).



FIGURE 4.30 – Icônes représentant les différents types de plateformes : petit dispositif, dispositif standard, mur d'écrans et dispositif immersif

#### 4.4.2 Environnement

L'environnement de travail a une incidence sur les performances de l'utilisateur et influence donc la représentation. Nous identifions cinq facteurs de l'environnement qui influencent les performances de l'utilisateur : l'éclairage, le confort thermique, l'ergonomie physique, le bruit et les vibrations [74]. Si à court terme l'éclairage est rarement identifié comme influençant les performances de l'utilisateur, il l'est à long terme. L'exemple de l'usage des liseuses dans des environnements sombres illustre l'impact de l'éclairage sur la représentation. Les types d'éclairage sont multiples. L'éclairage est défini par une couleur, un contraste, un éblouissement, etc. qui varie en fonction des localisations, des heures de la journée, etc. Autant de paramètres ne peuvent être synthétisés dans notre caractérisation des problématiques mais sont tout de même notables. Vis-à-vis de la température, exposer des utilisateurs à des températures trop basses ou trop élevées peut générer stress et malaise chez les utilisateurs. Bien que la température influence bien la visualisation elle n'en est pas pour autant une problématique des représentations. Les représentations n'ont aucune marge de manœuvre pour gérer un problème de température si ce n'est réduire au mieux la charge cognitive pour ne pas ajouter à celle apportée par la température. Or, réduire la charge cognitive n'est pas non plus une problématique dans le sens où elle n'est pas spécifique à un contexte mais nécessite d'être gérée quelle que soit la représentation. Le poste de travail influence les représentations de la même manière que la température, il est difficile de le relier directement à la représentation. Il en est de même pour le bruit bien qu'il faille prendre en compte que certaines visualisations dépassent le simple cadre de la perception visuelle et utilisent la perception sonore, elle-même très impactée par le bruit [52]. Enfin les vibrations, qui sont notamment présentes dans les systèmes aéroportés, peuvent avoir un impact très fort sur l'interaction et en tant que tel sur la visualisation mais leurs variations sont nombreuses et donc complexes à caractériser.

Un certain nombre des facteurs identifiés précédemment ont un impact évident sur la représentation, mais il est soit trop indirect soit trop complexe pour être pris en compte dans notre caractérisation des problématiques de représentations.

#### 4.4.3 Expérience de l'utilisateur

Les capacités des utilisateurs ont également un impact sur les représentations que ce soit au niveau des connaissances, de l'expérience ou des capacités physiques. Nous considérons les utilisateurs avec des capacités physiques standard et sans handicaps particuliers. Par conséquent, nous nous concentrons sur la caractérisation de l'expérience de l'utilisateur et de l'expertise des utilisateurs.

L'expérience de l'utilisateur comprend toutes les caractéristiques qui distinguent globalement les utilisateurs. Par exemple, la signification des couleurs varie selon les pays, de sorte que les utilisateurs de cultures différentes n'associent pas les couleurs aux mêmes significations. La prise en compte de l'expérience de l'utilisateur signifie prendre en compte ce qui caractérise un utilisateur. Cela signifie prendre en compte une énorme quantité de détails. Il est donc difficile de proposer une caractérisation exhaustive de l'expérience de l'utilisateur.

L'expertise de l'utilisateur définit la réaction de l'utilisateur face à un problème. Cette réaction dépend de la fréquence à laquelle l'utilisateur a été confronté au problème. Rasmussen et al. proposent une caractérisation de plusieurs modes de fonctionnement cognitifs associés à des niveaux d'expertise : compétences (*Skills*), règles (*Rules*) et connaissances (*Knowledges*) [78]. Le mode « connaissances » induit la plus grande charge cognitive. Il est utilisé face à un nouveau problème. L'utilisateur qui n'a aucune expertise sur un sujet ne peut compter que sur ses connaissances. Le mode de fonctionnement cognitif « règles » induit moins de charge cognitive car il repose sur l'utilisation de processus prédéfinis, les règles. Les règles correspondent aux actions que l'utilisateur doit effectuer dans une situation particulière. La création de règles implique d'avoir déjà fait face à la situation à plusieurs reprises. Enfin, le mode « compétence » implique moins de charge cognitive car il repose sur des réactions presque inconscientes acquises grâce à une longue expérience. Nous identifions ainsi trois niveaux d'expertise utilisateur définis par les modes de fonctionnement basés sur : des **compétences**, des **règles** et des **connaissances**.



FIGURE 4.31 – Icônes représentant les différents types d'expertises des utilisateurs influençant la représentation : compétences (S), règles (R) et connaissances (K)

#### 4.4.4 Synthèse

Nous avons identifié deux sous-catégories de problématiques de représentations liées au contexte d'utilisation : le type de dispositif et l'expertise utilisateur. Le type de dispositif se décline en : dispositif de petite taille, écran standard, mur d'écrans et dispositif immersif. Quant à l'expertise des utilisateurs elle se décline en mode de fonctionnement cognitif basé sur : des compétences, des règles ou des connaissances. En ROEM les utilisateurs sont face à des écrans standards mais rien ne contre indique l'utilisation d'autres dispositifs. Au niveau de l'expertise utilisateur les opérationnels étant potentiellement novices ils raisonnent dans le pire des cas en se basant sur leurs connaissances.

### 4.5 Conclusion

À l'aide du processus de visualisation nous avons identifié toutes les catégories de problématiques que résolvent les représentations. Pour chacune de ces catégories nous avons analysé l'existant en termes de caractérisation pour identifier toutes les problématiques découlant de ces catégories. Nous avons ainsi obtenu des caractérisations sur différents niveaux notamment vis-à-vis du type de données, décrivant une donnée avec des paramètres allant de son volume jusqu'au détail de ses attributs.

Une problématique de représentation est ainsi décrite par un contexte d'usage unique (dispositif et expertise utilisateur) et un ensemble d'activités. Chaque activité est décrite par une tâche et des caractéristiques des données sur lesquelles la tâche est réalisée. Ces données sont définies par un volume de données, une structure, une dimension et des caractéristiques d'attributs. Les attributs, quant à eux, sont définis par une propriété et une nature comme illustré dans la figure 4.32 qui synthétise les différents niveaux de notre caractérisation.

À l'aide de cette caractérisation nous pouvons décrire les représentations de l'existant et construire une cartographie des problématiques qui identifient, pour chaque problématique, les représentations qui la résolvent. Cette cartographie pourrait nous permettre d'identifier des relations entre les composants des représentations et les problématiques que résolvent ces représentations.

Dans le prochain chapitre nous détaillons les différents composants des représentations et mettons en place un outil qui se base sur la description des problématiques et des composants de nombreuses représentations existantes pour identifier ces relations. Une telle identification permet de surcroît de recommander la conception de représentations à partir de composants existant d'après une description de la problématique que l'on veut

résoudre. La mise en place de la caractérisation des problématiques et son usage pour recommander la conception sont des contributions de ces travaux [27].

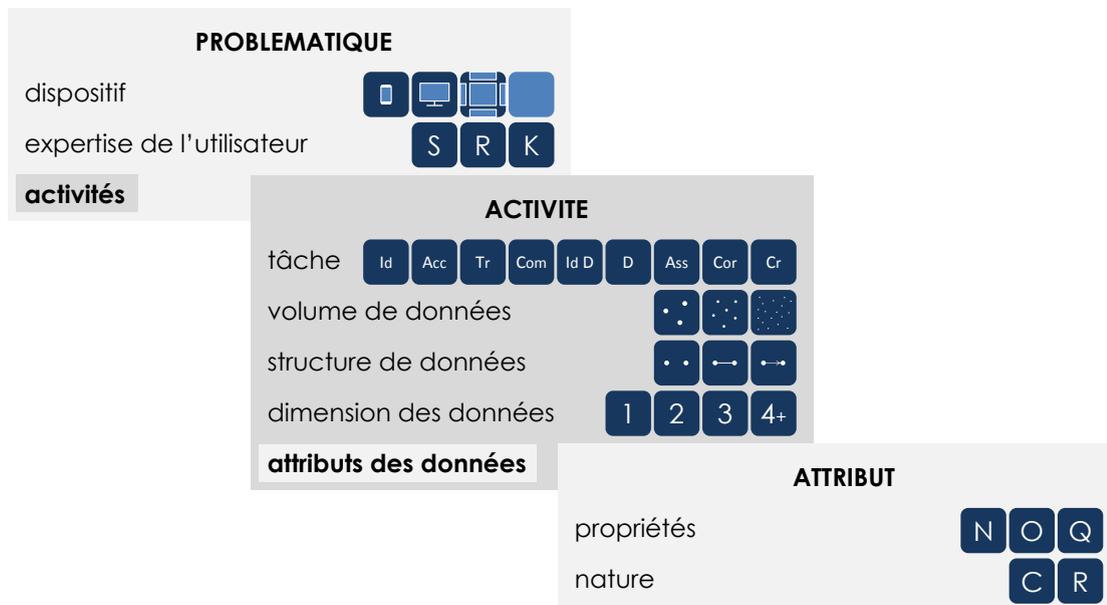


FIGURE 4.32 – Synthèse des caractéristiques des problématiques de représentation illustrant leurs relations arborescentes

## Chapitre 5

# Recommandation de conception

À l'aide de la caractérisation des problématiques de représentation nous sommes capable d'identifier les problématiques que résolvent de nombreuses représentations et donc d'identifier pour chaque problématique les nombreuses représentations qui la résolvent. En se basant sur les points communs de ces représentations nous pouvons identifier les composants participant à la résolution de ces problématiques.

Chapitre 3 nous avons identifié un manque de solutions explicites pour certaines problématiques et une incompatibilité de certaines solutions. L'identification de relations entre les composants des représentations et les problématiques qu'ils résolvent permettrait d'obtenir des solutions pour toutes les problématiques et descendrait à un niveau de granularité évitant les incompatibilités. Dans ce chapitre nous proposons une méthode pour extraire ces relations et les utiliser au moyen d'un outil de recommandation de conception, permettant de construire une représentation d'après une description de la problématique que nous voulons qu'elle résolve.

La recommandation de conception dans le domaine de la visualisation est un sujet abordé en 1986 par Mackinlay [68]. Il s'intéresse aux travaux de Bertin sur la sémiologie graphique (l'usage des variables visuelles) pour recommander la conception de représentations [15]. Il établit un certain nombre de règles impliquant les propriétés des données, les structures des représentations, les graphiques élémentaires et les variables visuelles lui permettant de recommander la conception de représentations en fonction des données à représenter.

Alors que les travaux de Mackinlay s'appuient principalement sur le type de données à représenter, d'autres outils proposent de se baser sur les besoins de l'utilisateur [81] ou sur ses différentes interactions [43] pour identifier des représentations appropriées. Dans

notre cas nous avons caractérisé les différentes problématiques de représentation, nous les utilisons donc toutes de manière combinée pour recommander des représentations.

Vis-à-vis du procédé de recommandation, certains outils se basent sur des modèles sémantiques ou des ontologies pour recommander des représentations [17, 42]. Ces bases de connaissances sont définies par des études ou des experts en visualisation pour permettre une meilleure recommandation [98]. Dans notre cas nous extrayons ces informations directement de l'existant ce qui enlève les biais dus à l'intervention d'un expert mais implique l'absence de contrôle vis-à-vis de la réutilisation de l'existant.

Enfin, certains systèmes évaluent les représentations de manière automatique. Si cette méthode est similaire à nos travaux du point de vue de l'automatisation, elle diffère du point de vue du procédé. En effet ces outils se basent sur une qualification des représentations [16] ou une modélisation des performances perceptives [6] alors que nous nous contentons d'exploiter l'existant dans une démarche exempte de toute évaluation vis-à-vis des visualisations existantes.

Pour mettre en place cet outil de recommandation nous commençons par identifier les différents composants des représentations. Nous illustrons ensuite l'extraction de relations entre les problématiques et les composants à l'aide d'un exemple. Puis, nous présentons l'outil de recommandation de conception qui se base sur un ensemble de relations pour proposer des représentations adaptées à des problématiques identifiées. Enfin, nous utilisons cet outil sur des problématiques du ROEM pour proposer de nouvelles solutions de représentation et valider notre outil de recommandation.

## 5.1 Identification des composants

Pour identifier les composants des représentations nous nous basons sur la description de la représentation définie par le *pipeline de l'Infovis* [28]. Cette définition décrit la représentation comme une série de transformations divisées en trois catégories : les transformations des données, les *mappings* visuels et les transformations de la vue. Chaque représentation est donc composée d'un ensemble de ces transformations que nous allons chercher à identifier. Cette identification se limitant à l'aspect statique des représentations nous nous intéressons aussi à l'identification des différentes interactions de visualisation.

### 5.1.1 Transformations des données

Les transformations de données pour la représentation correspondent à tous les traitements de données à but de représentations [9]. Parmi ces transformations nous identifions

les traitements visant à augmenter le nombre de données et ceux à le réduire [56]. Nous ne prenons pas en compte les transformations visant à modifier les données car nous ne les considérons pas comme du ressort de la représentation. La transformation visant à augmenter le nombre de données est l'**extrapolation**. Il s'agit d'ajouter des valeurs en faisant en sorte qu'elles ne modifient pas les paramètres généraux des données, comme la moyenne ou l'écart type. Parmi les transformations visant à réduire le nombre de données nous identifions les **transformations sélectionnant une partie des données** comme le filtrage ou l'échantillonnage et les **transformations agrégeant les données** en synthétisant leurs valeurs [30].

### 5.1.2 Mappings visuel

Les *mappings* visuel correspondent à l'encodage d'information à l'aide de variables visuelles [28]. Nous identifions dans l'existant quatre types de variables visuelles : les variables visuelles élémentaires, les variables visuelles de liaisons, les représentations sémantiques et les représentations textuelles. Les **variables visuelles élémentaires** sont tous les éléments graphiques pouvant varier en fonction d'une valeur : la couleur (teinte, saturation, luminosité), la position (dans trois dimensions), la taille, la forme, la texture, l'orientation, le mouvement, etc. [15, 68]. Elles encodent principalement les valeurs des attributs (cf. figure 5.1) mais peuvent aussi faire le lien entre les représentations d'une même donnée dans différentes vues [95] (cf. section 5.1.3). Les variables visuelles permettent donc d'encoder les informations contenues dans les données (valeurs des attributs, structure, etc.) mais aussi les informations issues de la représentation (relations entre différentes vues, etc.).

Les **variables visuelles de liaisons** correspondent souvent à des lignes. Ces lignes peuvent relier des données, encodant une information sur la structure (type graphe), relier une donnée et un concept, encodant une information sur une valeur (principalement nominale) de la donnée (cf. figure 5.2), ou relier deux représentations d'une même donnée dans des vues différentes, encodant la relation d'unité (cf. section 5.1.3).

Les **variables visuelles sémantiques** sont des manières de représenter des informations s'appuyant sur le sens de l'information à représenter. Par exemple, cela revient à illustrer une donnée ayant un attribut « animal » égal à « chien » par une image de chien (cf. figure 5.3). Il existe notamment des travaux sur l'usage de ces représentations sémantiques sachant que les utilisateurs ne les interprètent pas forcément de la même manière [18]. Ce type de représentation rejoint les travaux sur les représentations écologiques identifiés chapitre 3.

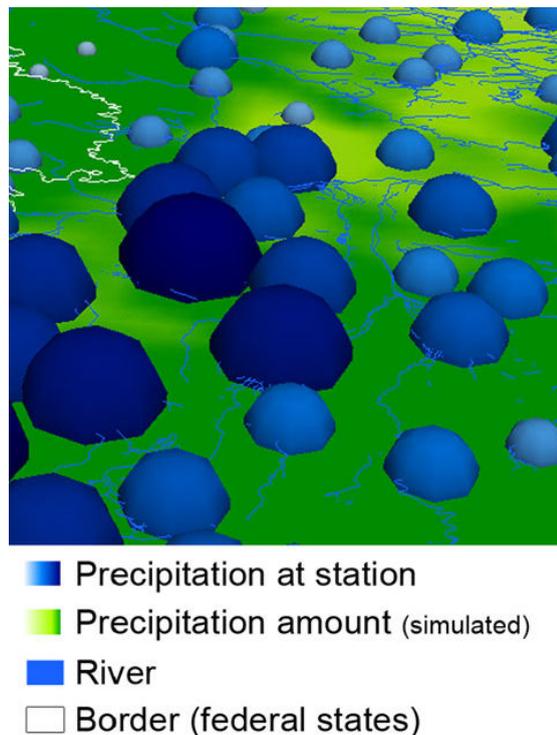


FIGURE 5.1 – Usage de variables visuelles de couleur (x2), de position et de taille pour représenter des données climatiques en fonction d’au moins quatre de leurs attributs [51]

Enfin les **représentations textuelles** encodent des informations par les mots qui leur sont associés, transmettant ainsi une information de manière moins biaisée comme peuvent l’être les représentations sémantiques. En parallèle, les textes contiennent leur propre encodage visuel permettant d’élargir les dimensions de représentation : gras, italique, taille, police, etc. [20].

### 5.1.3 Transformations de la vue

Les transformations de la vue correspondent à la façon d’agencer les vues. Il existe différentes façons de classifier ces agencements. Cela peut être en fonction du type de séparation : temporelle (vues accessibles à des moments différents) et spatiale (vues accessibles en même temps) [34]. Cela peut être en fonction du critère de séparation : niveau de détail, type d’attribut et valeur d’attribut. Enfin, cela peut être selon la composition des vues (principalement pour la séparation spatiale) : juxtaposition, superposition, surcharge et imbrication [57]. Nous allons identifier les différentes techniques de transformations en identifiant les différentes combinaisons de ces classifications. Nous retrouvons d’ailleurs certaines représentations identifiées chapitre 3.

Vis-à-vis de la variation du niveau de détail, sa mise en place à l’aide d’une séparation temporelle équivaut à faire varier le niveau de détail dans le temps et correspond donc

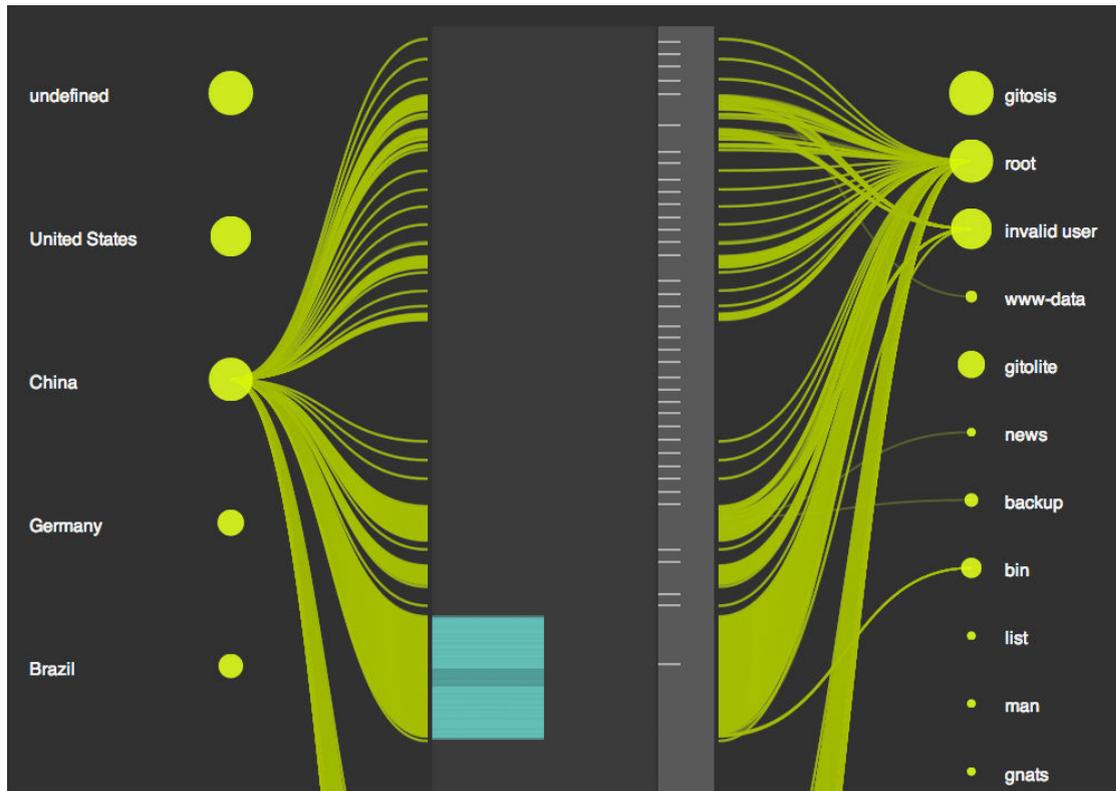


FIGURE 5.2 – Usage de variables visuelles de liaisons pour représenter des logs réseau [84].  
Chaque disque jaune correspond à un mot et est relié à tous les logs contenant ce mot.

au **zoom** [94]. La variation du niveau de détail vis-à-vis de la séparation spatiale est déclinable en différentes techniques en fonction de la composition des vues : la technique **Overview+detail** et la technique **Focus+Context**. La technique *Overview+detail* consiste à afficher en parallèle une vue détaillée et une vue synthétique des données et à mettre en avant la portion de données détaillée (cf. figure 5.4). La technique *Focus+Context* intègre la vue détaillée à la vue synthétique pour une meilleure contextualisation de la vue détaillée [11].

Vis-à-vis de la séparation des attributs, la **transformation séparant les attributs temporellement** ne correspond pas à une technique particulière. Il s'agit de modifier interactivement les paramètres de représentations. La **transformation séparant les attributs spatialement** est connue sous le nom de multi-vue. Le concept de multi-vue correspond à visualiser en même temps plusieurs vues encodant différents attributs de la donnée (cf. figure 5.5). Le concept de multi-vue est souvent couplé à des techniques de liaisons permettant de faire le lien entre les représentations d'une même donnée.

La **séparation des données**, qu'elle soit temporelle ou spatiale est basée sur les mêmes principes. Il s'agit de représenter des sous ensembles de la donnée soit de manière spatiale soit de manière temporelle [34]. Ainsi nous pouvons considérer la navigation et le filtrage comme des séparations temporelle des données. Quant aux séparations spatiales, il s'agit

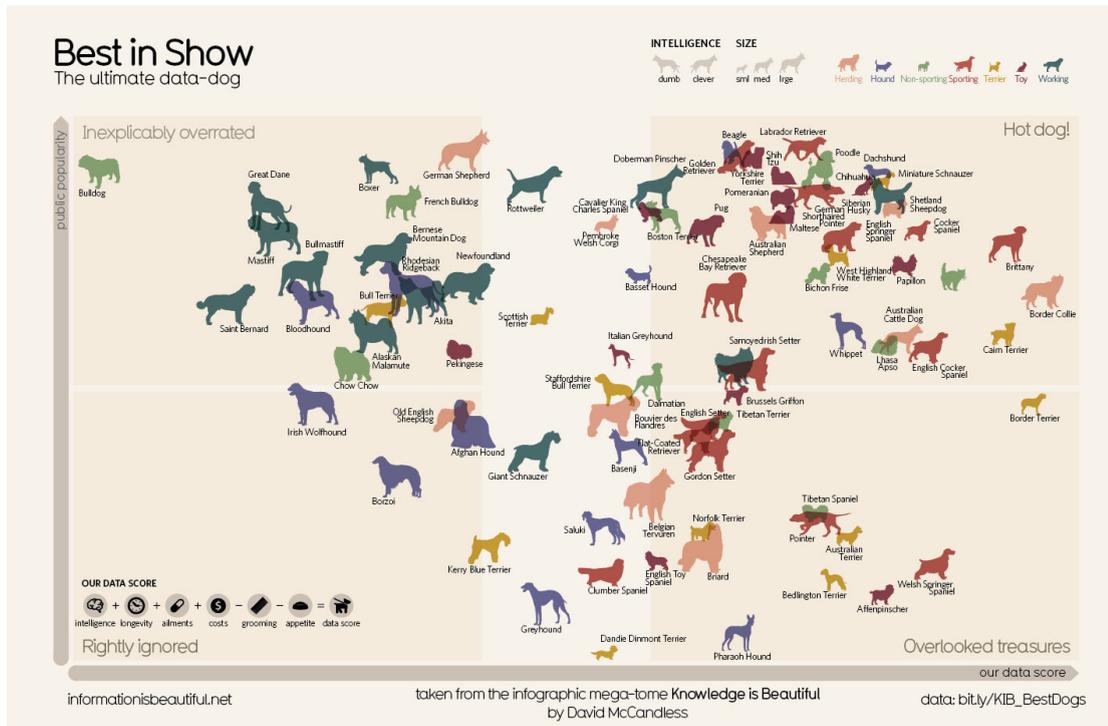


FIGURE 5.3 – Usage de variables visuelles sémantiques de formes et de taille pour représenter la valeur des différentes races de chien [69].

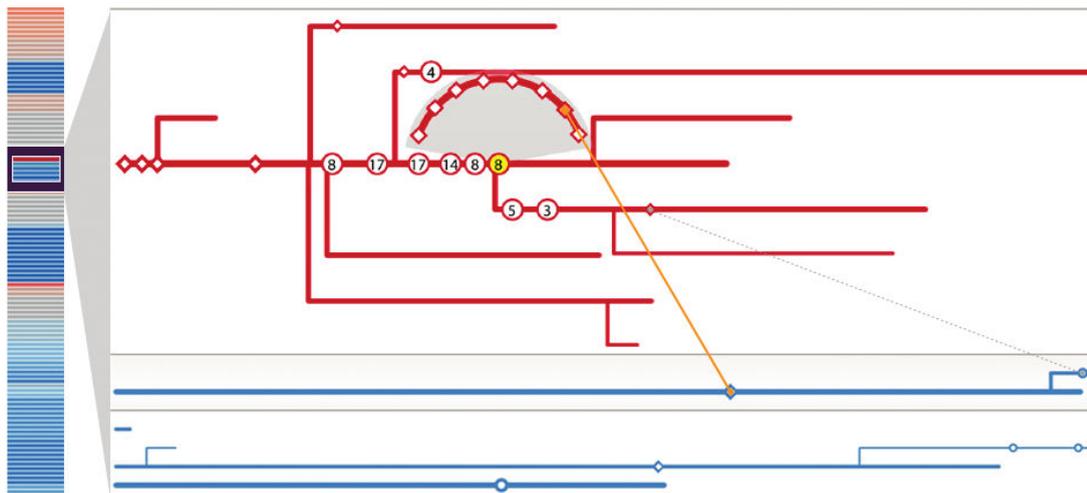


FIGURE 5.4 – Usage d'*Overview+detail* pour représenter des connexions du cerveau [5]. Cette représentation détaille trois ramifications dont deux sont reliées par un lien jaune.

principalement de diviser l'affichage en se basant sur des critères sur les données (nous retrouvons alors le filtrage) ou sur des critères visuels (cf. figure 5.6).

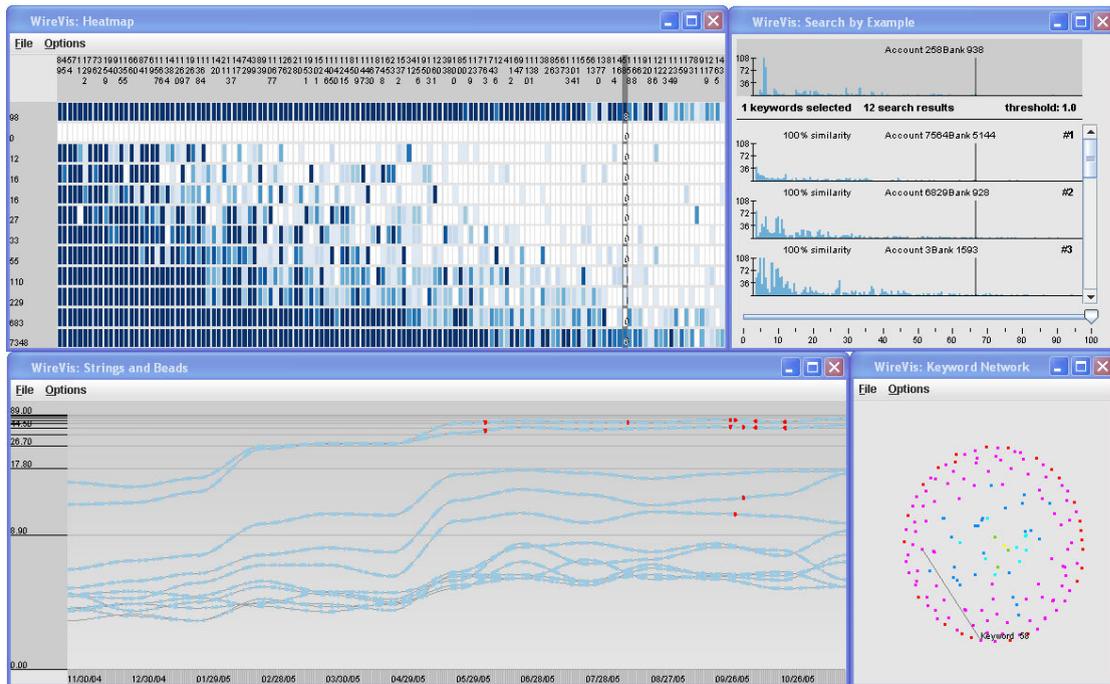


FIGURE 5.5 – Usage de la séparation spatiale des attributs pour représenter différents attributs de données bancaires [31].

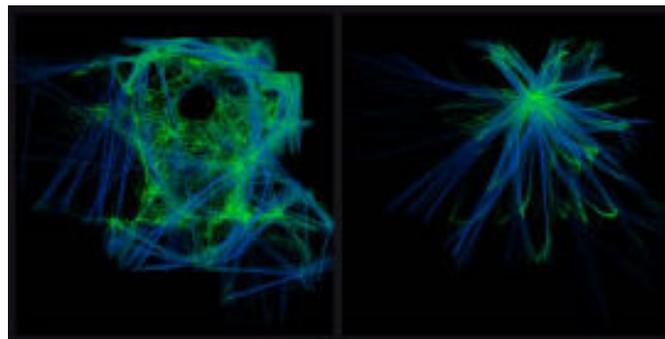


FIGURE 5.6 – Usage de la séparation spatiale des données sur des trajectoires d’avions [54]. Les trajectoires de droite sont toutes les trajectoires partant ou allant à Paris et celles de gauche sont toutes les autres.

#### 5.1.4 Interactions

Les interactions associées aux représentations correspondent à tous les moyens d’assister l’usage des représentations ou de transcrire les intentions de l’utilisateur au travers d’actions vers le système. Ces interactions permettent de **modifier la vue** (navigation, usage de menu, etc.), de **modifier le mapping visuel** (modifier l’encodage des données) et de **modifier les transformations les données** (modification des critères de filtrage, modification des échelles de représentation, etc.). Cette première description concerne le besoin d’interaction mais nous pourrions aussi décrire les moyens d’interaction comme l’usage d’interactions gestuelles, tactiles, directes, indirectes, etc. Cependant cela reviendrait à décrire un domaine tout aussi vaste que celui de la visualisation et n’est donc pas l’objet

de ces travaux. Nous nous contentons donc de nous arrêter à ce premier découpage relatif aux différentes transformations de la représentation [29].

### 5.1.5 Synthèse

Nous avons décrit les différents composants des représentations en nous basant sur le découpage extrait du *pipeline de l'InfoVis* [29]. Cela nous a permis d'identifier un certain nombre de composants :

- Transformation des données
  - Extrapolation
  - Suppression de données
  - Agrégation de données
- *Mapping* visuel
  - Position
  - Taille
  - Forme
  - Couleur
  - Motif
  - Mouvement
  - Liaison
  - Représentation sémantique
  - Représentation textuelle
- Transformation de la vue
  - Zoom
  - *Overview+Detail*
  - *Focus+Context*
  - Séparation temporelle des attributs
  - Séparation spatiale des attributs (multi-vue)
  - Séparation des données
- Interaction
  - Interaction sur une transformation des données
  - Interaction sur un *mapping* visuel
  - Interaction sur une transformation de la vue

Ayant identifié les caractéristiques des problématiques chapitre 4 nous avons maintenant les outils pour décrire chaque représentation en fonction des problématiques qu'elle résout ainsi que des éléments qui la composent. Nous pouvons ainsi utiliser ces descriptions pour

identifier la présence de relations entre ces deux aspects des représentations dans l'optique de recommander leur conception.

## 5.2 Extraction des relations

L'identification de relations entre problématiques de représentation et composants nécessite la description de nombreuses représentations. Pour cela nous avons analysé plus de vingt-cinq représentations que nous estimons être représentatives du domaine et qui explicitent leurs composants et les différentes problématiques qu'elles résolvent (cf. annexe A). Pour illustrer la démarche mise en place nous explicitons la description de la représentation GapMinder de Hans Rosling (cf. figure 5.7). Nous identifions les problématiques qu'elle résout puis les composants grâce auxquels cela est possible, avant de mettre en relation les problématiques et les composants identifiés.

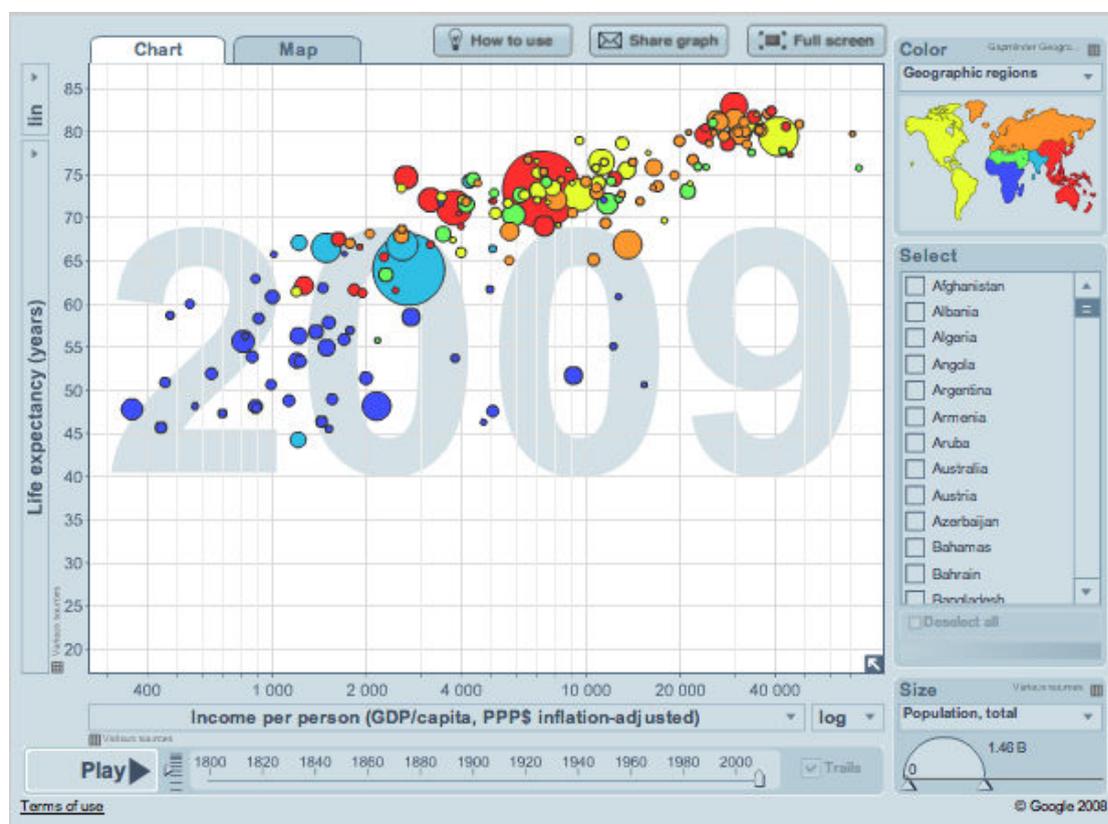


FIGURE 5.7 – Image de la représentation GapMinder [79]. Chaque disque représente un pays dont la position est définie par l'espérance de vie et le revenu par habitant.

### 5.2.1 Description des problématiques

GapMinder est un outil qui permet de lutter contre les idées reçues sur le développement mondial [79]. Il est destiné à être utilisé sur un **ordinateur de bureau**, par des **utilisateurs**

**novices.** GapMinder permet, entre autres, de corrélérer les valeurs d'espérance de vie au revenu par habitant de chaque pays identifié par région géographique comme présenté figure 5.7. La tâche relative à cette activité est donc la **corrélation**. Le volume de données associé est **moyen** et les données ne sont **pas structurées**. Vis-à-vis de la dimension des attributs, comme chaque donnée peut être identifiée par un pays et une date de manière unique les données sont **bidimensionnelles**. Les attributs mis en jeu sont l'espérance de vie qui est **quantitatif** et **caractéristique**, le revenu par habitant qui est **quantitatif** et **caractéristique**, et le type de région géographique qui est **nominal** et **caractéristique**. GapMinder permet aussi de vérifier si les corrélations identifiées à certaines dates sont toujours d'actualité en permettant l'accès aux données à partir d'une date. Cette activité implique la tâche d'**accès aux valeurs** pour le même type de volume, de structure et de dimension mais uniquement pour l'attribut temps, qui dans ce contexte est **ordinal** et **référentiel**. Cette description des caractéristiques de GapMinder est présentée figure 5.8.



FIGURE 5.8 – Illustration des problématiques que résout GapMinder

### 5.2.2 Description des composants

Nous nous intéressons maintenant aux composants qui permettent de résoudre de telles problématiques. Chaque pays est représenté par un disque dont la taille est relative au nombre d'habitants, la couleur à la région du monde et la position en deux dimensions à l'espérance de vie et le revenu par habitant. Bien que cela ne soit pas forcément explicite dans l'illustration de GapMinder, il est possible d'accéder à d'autres pages de temps en utilisant la barre de navigation en bas de l'écran. Cette interaction entraîne alors une transformation de la vue supportée par un filtrage des données. Cette description rapide nous permet d'identifier un certain nombre de composants relatifs à notre problématique. Comme nous nous intéressons à la corrélation entre espérance de vie, revenu et région géographique, seules les variables visuelles élémentaires de **position** en deux dimensions et de **couleur** sont à considérer. En ce qui concerne l'accès aux informations, cette tâche

est réalisable par le biais d'une **navigation**, d'une **séparation temporelle de la vue** et d'un **filtrage** des données en fonction du temps.

### 5.2.3 Mise en relation

La description des problématiques et des composants nous permet d'associer la problématique détaillée précédemment et les composants : couleur, position (x2), séparation temporelle, filtrage et navigation. En réalisant une telle identification sur un nombre significatif de représentations, des récurrences pourraient apparaître sur lesquelles nous pourrions nous baser pour construire de nouveaux systèmes. Par exemple, si nous identifions que l'utilisation de la couleur va de pair avec la corrélation d'attributs nominaux dans de nombreuses représentations à l'instar de GapMinder, nous l'envisagerions pour la conception de nouveaux systèmes.

Cependant, au vu du nombre de composants et de problématiques impliqués dans chaque représentation, il est possible que ce genre de lien ne puisse pas être établi. Vis-à-vis de notre exemple, si la couleur permet bien la corrélation d'attributs nominaux, si la position permet la corrélation d'attributs quantitatifs et si ces deux tâches sont présentes conjointement dans un nombre significatif de représentations, il sera impossible de savoir laquelle de la couleur ou de la position permet la corrélation d'attributs nominaux. Ainsi, l'association d'une problématique à un groupe de composants semble être de trop haut niveau pour permettre d'extraire des relations.

Nous nous interrogeons donc sur l'usage d'une extraction guidée comme nous l'avons partiellement fait en sélectionnant des sous-parties des problématiques. Dans le cas de GapMinder les composants de couleur et de position (x2) encodent respectivement les régions du monde, l'espérance de vie et le revenu par habitant. L'accès à l'information temporelle est quant à lui possible grâce à la navigation. Enfin, les transformations de la vue et de la donnée que sont la séparation spatiale et le filtrage semblent lier la réalisation des tâches de corrélation et d'accès aux informations. Un tel guidage biaise évidemment la conception car il se base sur l'interprétation de l'extracteur mais assure l'extraction de relations, nécessaire à la recommandation (cf. figure 5.9).

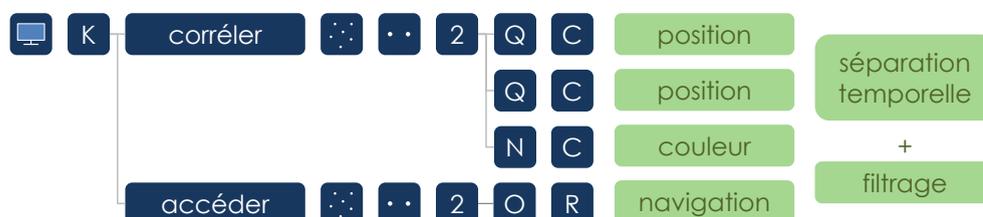


FIGURE 5.9 – Problématiques et composants de GapMinder mis en relations

### 5.2.4 Synthèse

Nous avons présenté une méthode pour extraire les relations entre les composants des représentations et les problématiques qu'ils résolvent. Nous avons illustré comment identifier les problématiques des représentations sur l'outil GapMinder ainsi que les composants qui le composent. À l'aide de ces descriptions nous avons identifié deux manières d'accéder aux relations : en extrayant des associations similaires uniquement sur un nombre important de relations ou en guidant l'association. L'extraction menée sur un nombre important de relations, bien que la plus objective, ne permet pas forcément d'identifier des relations. L'association guidée, même si biaisée par le guidage, garantit quant à elle l'extraction de relations et est donc la méthode choisie pour recommander la conception de représentation.

## 5.3 Création d'un outil de recommandation

Afin d'exploiter l'existant de manière pertinente nous mettons en place un outil de recommandation de conception basé sur les relations entre problématiques et composants. Le principe de cet outil est de proposer un ensemble de composants adaptés à une problématique en se basant sur ces relations. Nous implémentons ce principe à l'aide du langage de programmation *Prolog* car il permet la création de bases de connaissance et la résolution de problèmes logiques basés sur ces connaissances.

L'outil de recommandation prend en entrée une problématique que l'on veut résoudre à l'aide de l'existant. La déclaration d'une problématique reprend son aspect arborescent en imbriquant des activités et des attributs (cf. code source 5.1).

Code source 5.1 – Exemple de description de problématique à résoudre

```
% Déclaration des attributs attr1, attr2 et attr3 selon le modèle suivant :
% attribut(Attribut, Propriete, Nature).
attribut(attr1, quantitatif, referentiel).
attribut(attr2, quantitatif, caracteristique).
attribut(attr3, ordinal, caracteristique).
% Déclaration des activités acti1 et acti2 contenant les attributs attr1,
% attr2 et attr3 selon le modèle suivant :
% activite(Activite, Tache, Volume, Structure, Dimension,
% ListeAttribut).
activite(acti1, correler, moyen, none, tridimensionnelle, [attr1, attr2]).
activite(acti2, creer, moyen, none, bidimensionnelle, [attr3]).
% Déclaration de la problématique probl1 contenant les activités acti1 et
```

```
% acti2 selon le modèle suivant :
% problematique(Problematique, Dispositif, Expertise, ListeActivite).
problematique(probi, ecranStandard, novice, [acti1, acti2]).
```

L'objectif de l'outil est de déterminer les composants permettant de résoudre une problématique en la comparant aux relations entre problématiques et composants. Le premier enjeu est donc de décrire les relations entre problématiques et composants. Les problématiques ont des structures arborescentes contenant un ensemble d'activités et un ensemble d'attributs. Il faut donc déterminer le comportement des composants face à ces problématiques et la manière de les associer. Nous avons constaté que chaque problématique est liée à des composants au travers de l'encodage de ses attributs (variable visuelle) ou d'un moyen d'interaction, et que les transformations de la vue ou des données semblent liées aux problématiques de manière indirecte, principalement vis-à-vis des variables visuelles (la séparation de la vue permet d'utiliser plusieurs fois une même variable visuelle et cette dernière est souvent spatiale quand il s'agit de représenter des attributs d'une même activité).

Pour intégrer ces différents fonctionnements dans notre outil de recommandation nous le simplifions en considérant chaque relation comme une association entre un composant de type variable visuelle ou interaction et des caractéristiques de problématiques à l'échelle de l'attribut (cf. code source 5.2).

#### Code source 5.2 – Exemple de description de relations

```
% Déclaration de relations selon le modèle suivant :
% relation(Dispositif, Expertise, Tache, Volume, Structure, Dimension,
% Propriete, Nature, Composants).
relation(ecranStandard, novice, correler, moyen, none, tridimensionnelle,
quantitatif, caracteristique, couleur).
relation(ecranStandard, expert, associer, moyen, structureOrientees,
bidimensionnelle, quantitatif, referentiel, position).
relation(ecranStandard, novice, creer, large, none, bidimensionnelle,
ordinal, caracteristique, selection).
```

Une fois les relations décrites, il faut les utiliser pour identifier les composants résolvant toutes les problématiques données. La linéarisation des problématiques et l'écartement provisoire des composants de transformation pour décrire les relations permettent de comparer facilement la structure arborescente d'une problématique à résoudre aux relations. La problématique est ainsi découpée pour être comparée aux relations ce qui permet l'identification d'un groupe de composants par activité de la problématique.

Les transformations de la vue sont ensuite ajoutées en fonction des variables visuelles ou des interactions identifiées. L'ajout se fait de sorte à avoir un seul type de variable visuelle par vue et uniquement des séparations spatiales dans une même activité (cf. annexe A). On obtient ainsi des listes de couples (attribut, composants) structurées par des transformations de la vue (cf. code source 5.3). Pour choisir parmi la liste la plus adaptée l'outil possède une fonctionnalité supplémentaire qui choisit la solution la plus représentée.

Code source 5.3 – Exemple de description de requête et de réponse de l'outil de recommandation

```
% Appel de la fonction de recommandation
getRepresentation(R, prob1).

% Liste des valeurs que peut prendre R d'après les relations décrites.
% Ce résultat recommande l'utilisation de la couleur pour représenter
% attr1 et attr2 dans des vues différentes et l'utilisation de la position
% pour représenter attr3.
R = ...;
R = [[multivue, (attr1, couleur), (attr2, couleur)], [(attr3, position)]];
R = ...;
```

Pour conclure, nous avons mis en place un outil qui se base sur la mise en relation des problématiques de représentation et des composants pour proposer un ensemble de composants correspondant à une problématique spécifique. Dans l'objectif d'obtenir un outil fonctionnel nous avons simplifié ces relations et mis en place un mécanisme d'extraction de connaissances à partir d'une description des problématiques à résoudre. Dans la section qui suit nous allons maintenant chercher à utiliser cet outil et à valider son apport.

## 5.4 Apport et validation de l'outil de recommandation

Ayant mis en place un outil de recommandation de conception nous nous intéressons à sa validation ainsi qu'à son apport pour le ROEM. Nous présentons trois représentations, dont la conception est basée sur notre outil, répondant à des cas d'usage du ROEM. Pour chaque représentation nous commençons par présenter le cas d'usage à leur origine dont nous extrayons des problématiques de représentations. Nous présentons ensuite les recommandations issues des problématiques et leurs interprétations sous forme de représentations. Nous évaluons ensuite l'apport de ces représentations et discutons de la validité de notre outil de recommandation.

Nous avons établi que le cas d'application général de ces travaux, qui est la caractérisation de signaux radar en fonction de leur signature, n'avait pas de solution dans l'existant. Nous confrontons donc cet outil basé sur l'existant à d'autres problématiques du ROEM ayant des besoins de visualisation. Par exemple, les données peuvent être localisées ou en très bon état, facilitant la caractérisation et la rendant réalisable par des traitements automatiques, mais nécessitant néanmoins une interprétation humaine finale. En parallèle, l'analyse du ROEM ne se limite pas forcément à de la caractérisation mais s'intéresse à toutes sources de renseignement liées aux données électromagnétiques.

### 5.4.1 TimeTower

Une des activités des opérateurs du ROEM est le suivi de l'activité des radars. Cela consiste à localiser leurs émissions, identifier leur périodicité d'émission et identifier toute anomalie dans leur fonctionnement pouvant indiquer une cessation d'activité, un changement de fonctionnement ou un changement de système radar. La problématique dans laquelle s'inscrit cette activité est générique au ROEM, il s'agit de représenter des données sur un **ordinateur de bureau** pour des **utilisateurs novices**. Vis-à-vis de l'activité, elle implique un besoin de **détection de singularité** sur des données en **grandes quantités** et **non structurées**. Les données étant définies de manière unique par une longitude, une latitude et une date, il s'agit de données **tridimensionnelles**. Enfin, les attributs impliqués dans cette activité sont la latitude, la longitude et le temps qui sont **quantitatifs** et **référentiels**, et aussi la fréquence ou la DI, dont les variations peuvent indiquer un changement de système, qui sont **quantitatifs** et **caractéristiques** (cf. figure 5.10 et code source 5.4).

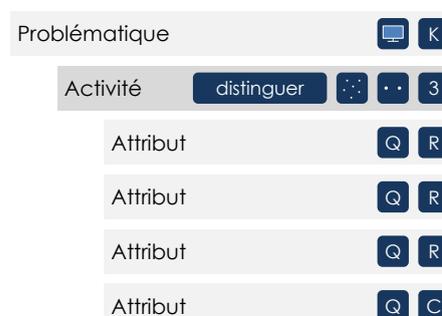


FIGURE 5.10 – Problématique associée à la représentation TimeTower

Code source 5.4 – Description de la problématique associée à la représentation TimeTower en Prolog

```

attribut(longitude, quantitatif, referentiel).
attribut(latitude, quantitatif, referentiel).
attribut(temps, quantitatif, referentiel).

```

```
attribut(frequence, quantitatif, caracteristique).
```

```
activite(identifieurAnormalites, distinguer, moyen, none,
tridimensionnelle, [longitude, latitude, temps, frequence]).
```

```
problematique(suivisActiviteRadar, ecranStandard, novice,
[identifieurAnormalites]).
```

En décrivant les problématiques du suivi d'activité radar dans notre outil de recommandation nous obtenons un certain nombre de combinaisons de composants parmi lesquelles nous choisissons la plus récurrente. Dans l'exemple courant, la combinaison la plus récurrente est l'usage de la position en trois dimensions pour les attributs référentiels et celle de la couleur pour les attributs caractéristiques (cf. code source 5.5).

Code source 5.5 – Retour de l'outil de recommandation pour la problématique de TimeTower

```
getRepresentation(R, suivisActiviteRadar).
```

```
R = ...;
R = [[(latitude, position), (longitude, position), (temps, position),
(frequence, couleur)]];
R = ...;
```

Nous interprétons donc ces recommandations en encodant la latitude, la longitude et le temps en position et la fréquence en couleur. Nous obtenons ainsi une représentation tridimensionnelle que nous avons nommée TimeTower. Elle est composée d'un fond de carte où les différentes écoutes et leurs caractéristiques sont représentées par des cubes de couleur dont la position en profondeur est définie par le temps (cf. figure 5.11).

Dans la représentation TimeTower chaque signal radar est représenté par une pile de cubes, droite ou non, selon que le signal est émis par un système fixe ou en mouvement. Chaque cube correspond à une écoute dont les caractéristiques sont représentées par leur couleur. L'identification d'une pile permet d'identifier la position de l'émission, son aspect dynamique ou non, sa vitesse, et surtout son évolution. Toute irrégularité dans une pile comme un changement de couleur ou une absence de cubes permet d'identifier une irrégularité dans l'émission du signal radar.

Ce principe de représentation a déjà fait ses preuves pour la visualisation de données temporelles et il existe de nombreux travaux utilisant la troisième dimension pour représenter le temps [8, 88, 90]. L'outil de recommandation a donc permis d'accéder à

une représentation correspondant aux besoins décrits en décomposant et réarrangeant l'existant.

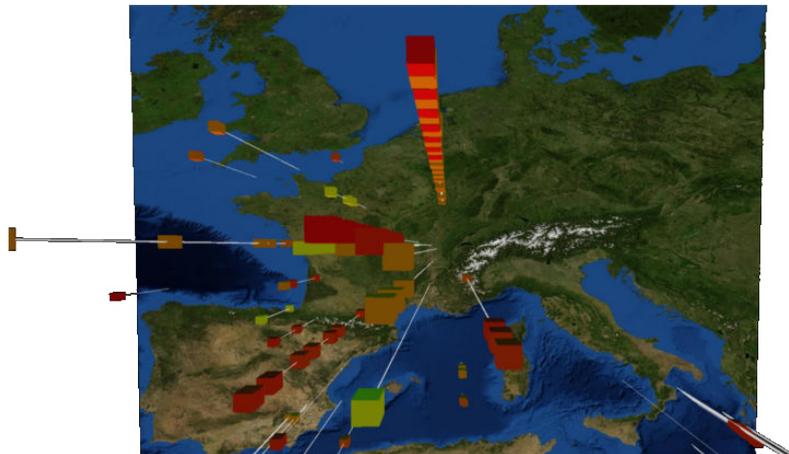


FIGURE 5.11 – Image de la représentation TimeTower

Nous sommes allé plus loin avec cette visualisation en s'intéressant à l'apport du positionnement de la troisième dimension face à l'utilisateur [59, 63] et de l'usage de la vision stéréoscopique et du *motion parallax* pour mieux interpréter les données [102]. Cela accroît la perception de l'attribut encodé en profondeur compensant légèrement les biais induits par la perspective [19, 102]. En parallèle, cette représentation a fait l'objet de discussions au sein de Thales Systèmes Aéroportés permettant d'enrichir les outils de conception pour l'analyse ROEM et de médiatiser l'usage de la visualisation 3D pour des attributs non-spatiaux.

#### 5.4.2 PulseTrain

La difficulté la plus importante dans la caractérisation de signatures de signal est le mélange de plusieurs signaux. Or, certains opérateurs travaillent sur des données contenant un seul signal notamment dans le milieu maritime. L'étape de distinction des signaux radars se résume donc à une identification des différentes variations de valeurs dont celles cycliques de la DI et de la PRI. Une des activités des opérateurs du ROEM est ainsi d'identifier les valeurs du motif en DI et en PRI sur des impulsions appartenant à un unique signal. La problématique dans laquelle s'inscrit cette activité est générique au ROEM, il s'agit de représenter des données sur un **ordinateur de bureau** pour des **utilisateurs novices**. L'activité implique un besoin d'**identifier des valeurs** sur des données en **grandes quantités** et **non structurées**. Dans la mesure où les données ne concernent qu'un seul et même signal, chaque impulsion est définie par une unique valeur temporelle de sorte que les données sont **unidimensionnelles**. Enfin, les attributs impliqués dans cette

activité sont la DI et la DTOA qui sont **caractéristiques** et **quantitatives** ainsi que le temps dont seul l'aspect **ordinal** est nécessaire et qui est **référentiel** (cf. figure 5.12).

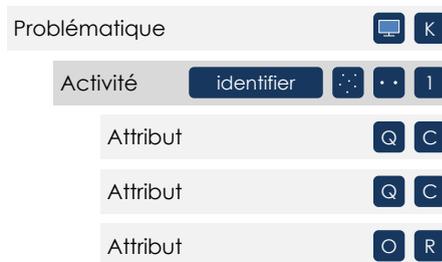


FIGURE 5.12 – Problématique associée à la représentation PulseTrain

En décrivant les problématiques du suivi d'activité radar dans notre outil de recommandation nous obtenons un certain nombre de combinaisons de composants dont la recommandation de l'usage de la couleur pour les attributs DI et DTOA et de l'usage de la position pour le temps de manière ordinaire (cf. code source 5.6).

Code source 5.6 – Retour de l'outil de recommandation pour la problématique de PulseTrain

```
R = ...;
R = [[overview+detail, (di, couleur), (dtoa, couleur), (temps, position)]];
R = ...;
```

Ces recommandations ont conduit à la création d'une représentation nommée PulseTrain. Elle consiste à représenter les impulsions par des rectangles de deux pixels de largeur, colorés selon la DI et la DTOA et positionnés les uns à côté des autres en fonction de leur occurrence temporelle (cf. figure 5.13). À l'aide de cet outil les opérateurs du ROEM peuvent rapidement identifier les répétitions de valeurs en DI et en DTOA sur une grande quantité de données pour une coloration correctement ajustée.

Ce principe de représentation s'apparente aux représentations dites « pixel-based » permettant de représenter un grand nombre d'informations [65]. L'aspect intéressant de cette recommandation est le fait de recommander la position pour un attribut ordinal (le temps) créant ainsi l'effet « pixel-based » qui gère la quantité de données.

Pour mettre au point un outil réellement fonctionnel nous avons ajouté plusieurs fonctionnalités. La première est un outil de coloration permettant de répartir la couleur de manière linéaire, logarithmique ou selon les préférences de l'utilisateur pouvant se baser sur une distribution des valeurs. Cela permet d'ajuster la coloration à souhait et ainsi d'identifier des motifs de manière exploratoire.

La deuxième fonctionnalité mise en place est un principe de *focus+context*. Cela permet aux opérateurs d'accéder aux détails de ces répétitions pour identifier les valeurs des motifs mais aussi détecter des impulsions manquantes ou du bruit.

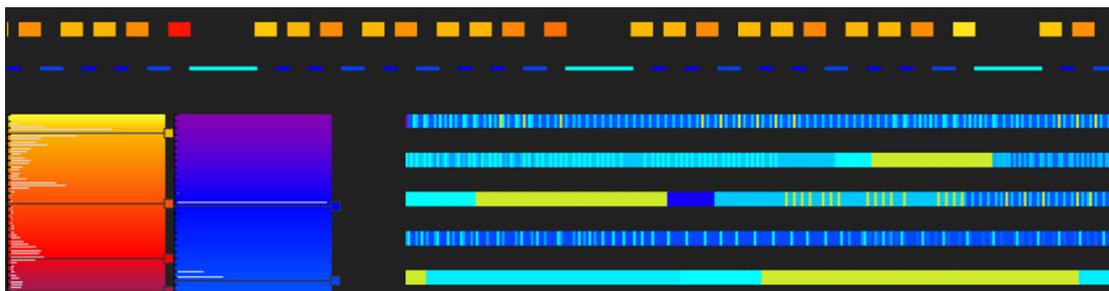


FIGURE 5.13 – Image de la représentation PulseTrain

La proposition issue de l'outil de recommandation et les différentes fonctionnalités ajoutées ont permis la mise en place d'une représentation fonctionnelle. Cette dernière a fait l'objet de discussions auprès de personnels militaires qui en ont validé l'usage et l'intérêt, ce qui a ainsi permis d'enrichir les outils de conception d'analyse ROEM de Thales Systèmes Aéroportés.

### 5.4.3 Parallel coordinates

Lors de l'analyse ROEM les opérateurs ne sont pas directement confrontés à des données difficilement exploitables. Un même fichier peut contenir des données facilement identifiables et des données complexes. Un fichier peut aussi contenir uniquement des données complexes mais ayant certaines caractéristiques permettant un premier regroupement en sous-analyse. Le ROEM nécessite donc un outil ayant une vue d'ensemble qui permet d'associer les caractéristiques des impulsions. La problématique dans laquelle s'inscrit cette activité est générique au ROEM, il s'agit de représenter des données sur un **ordinateur de bureau** pour des **utilisateurs novices**. Vis-à-vis de l'activité, elle implique un besoin d'**association** de valeurs sur des données en **grandes quantités, non structurées et multidimensionnelles** car nous nous intéressons à tous les attributs potentiels du ROEM. Ainsi, les attributs impliqués dans cette activité sont au moins cinq, sont **quantitatifs** et sont soit **caractéristiques** soit **référentiels** (cf. figure 5.14).

FIGURE 5.14 – Problématique associée à un *parallel coordinates* pour le ROEM

En décrivant les problématiques de suivi d'activité radar dans notre outil de recommandation nous obtenons un certain nombre de combinaisons de composants dont la recommandation de l'usage de la position cinq fois ainsi que de la multi-vue et de connexions (cf. code source 5.7). Cette description n'est autre que celle du *parallel coordinates* qui est une représentation connue pour la gestion de données multidimensionnelles (cf. figure 5.15).

Code source 5.7 – Retour de l'outil de recommandation pour la problématique de *parallel coordinates* pour le ROEM

```
R = ...;
R = [[mutlivue+connexion, (temps, position), (frequence, position), (di,
position), (dtoa, position), (niveau, position)]];
R = ...;
```

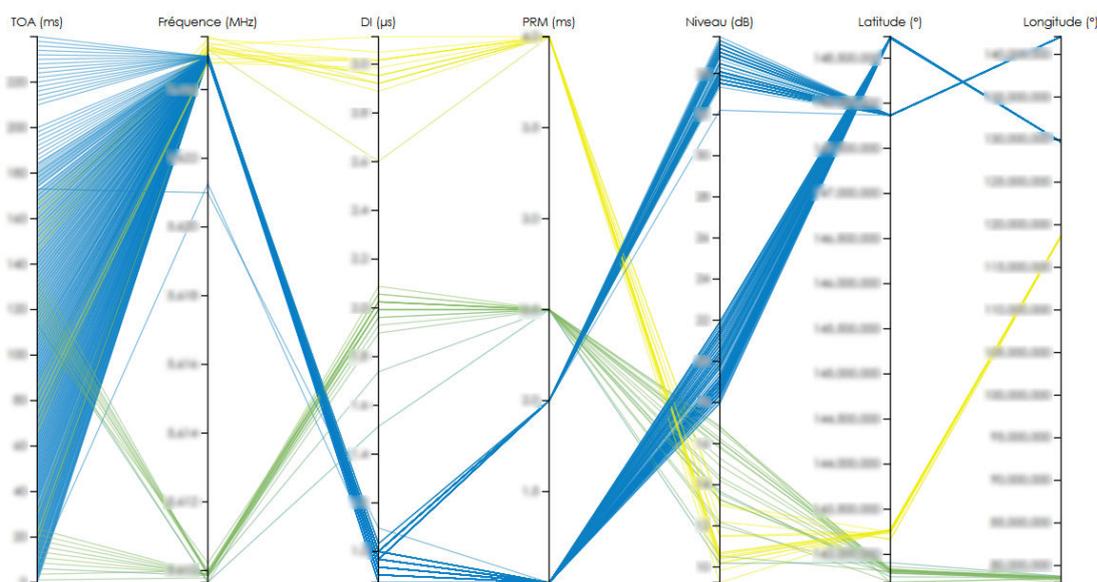


FIGURE 5.15 – Image d'un *parallel coordinates* pour le ROEM

L'usage de *parallel coordinates* pour le ROEM permet d'associer facilement des groupes de données sur un nombre important d'attributs et peut même aller, en cas de signaux très propres, jusqu'à l'identification des caractéristiques des signatures du signal. La parallélisation des axes permet une mise en relation très rapide des différents attributs même sur des nombres d'attributs conséquents. Cette mise en relation permet de désambiguïser certains cas où les données ont les mêmes valeurs.

Les qualités de synthèse et d'accès aux valeurs de l'outil *parallel coordinates* ont été jugés très pertinentes par Thales Systèmes Aéroportés de sorte que son intégration à des outils est en cours d'étude. Son usage pourrait permettre de précéder l'analyse ROEM pour sélectionner une partie du fichier, assister la caractérisation des signaux radar ou encore participer à la validation des signaux radars lors de leur conception.

#### 5.4.4 Discussion

Grâce à l'outil de recommandation nous avons pu concevoir des représentations résolvant des problématiques du ROEM. Cependant, l'apport de ces représentations est difficilement quantifiable car il n'existe pas de représentations existantes auxquelles les comparer. Ces problématiques étaient principalement gérées à l'aide de traitements automatiques. Ce n'est qu'avec l'accroissement de la complexité et de la quantité des données que les utilisateurs ont été mis dans la boucle. Les représentations consacrées aux problématiques du ROEM sont donc très peu nombreuses et de nombreuses problématiques n'ont donc pas de solutions visuelles.

Vis-à-vis de l'évaluation de l'outil de recommandation en lui-même, son évaluation nécessite de comparer les résultats qu'il fournit à l'existant. Or, les résultats qu'il fournit sont non seulement des morceaux d'existants, mais sont aussi assemblés selon l'existant. Une telle évaluation semble trop fermée pour être pertinente, nous n'avons donc pas encore trouvé de moyen d'évaluer notre outil.

#### 5.4.5 Synthèse

À l'aide de notre outil de recommandation, nous avons généré des recommandations de conception qui nous ont permis de mettre au point trois outils répondant à des problématiques du ROEM : TimeTower, PulseTrain et un *parallel coordinate* pour le ROEM. Que ces outils correspondent à des outils déjà existants ou à des morceaux de l'existant, leur mise en avant par l'outil de recommandation semble pertinente car ils résolvent les problématiques pour lesquelles ils ont été conçus. Enfin, si ces représentations sont difficilement évaluables car il n'existe rien auquel les comparer, l'outil de recommandation l'est encore moins car il est trop dépendant de l'existant.

### 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en place un outil de recommandation de conception. Nous avons commencé par identifier les différents éléments qui composent une représentation. Cela nous a permis de décrire de nombreuses représentations en fonction de leurs composants et des problématiques qu'elles résolvent de façon à obtenir un nombre conséquent d'associations entre composants et problématiques. Nous avons illustré la construction de ces associations à l'aide de la représentation GapMinder, puis nous avons détaillé le fonctionnement de l'outil de recommandation. Cet outil s'appuie sur des associations entre problématiques et composants pour recommander la conception de représentation.

Il permet d'identifier pour une problématique donnée des combinaisons de composants qui la résolvent.

À l'aide de cet outil nous avons proposé des représentations pour le ROEM destinées à être intégrées aux produits de Thales Systèmes Aéroportés. Ces différents outils ont permis de répondre aux problématiques pour lesquelles ils ont été conçus et certains font l'objet d'études pour identifier leur potentiel et généraliser leur usage au sein de Thales Systèmes Aéroportés.

La pertinence des représentations proposées par l'outil de recommandation nous permet de confirmer son apport vis-à-vis de l'analyse de l'existant, cependant si l'on cartographie les différentes combinaisons de problématiques nous identifions des combinaisons n'étant associées à aucun composant ce qui est notamment le cas de la problématique de ROEM identifiée chapitre 3. Cette absence de solutions fait émerger le besoin d'identifier de nouveaux composants de représentation qui résoudraient de telles combinaisons de problématiques. Pour ce faire, chapitre 6 nous étudions de nouvelles technologies pour la visualisation et notamment l'usage de la visualisation 3D et de l'immersivité au travers du prototype HeloVis résolvant la problématique du ROEM.

## Chapitre 6

# HeloVis : un outil de visualisation immersif pour le ROEM

Après avoir identifié l'existant et mis en place des outils pour l'analyser de manière pertinente nous nous intéressons aux problématiques qui n'ont pas de solutions dans l'existant. Puisque la composition d'éléments existants ne semble pas suffire, nous nous sommes penché sur l'usage de nouveaux composants et notamment de nouvelles technologies pour la visualisation. Dans ce chapitre nous présentons HeloVis, une représentation interactive s'appuyant sur l'existant mais aussi sur la perception 3D et l'immersivité pour permettre l'analyse ROEM. Nous commençons par décrire HeloVis puis nous l'évaluons pour comprendre et mesurer son apport.

### 6.1 Description

Afin de décrire l'outil HeloVis nous commençons par présenter son contexte et son principe. Nous présentons ensuite les travaux existants auquel il peut être comparé et explicitons l'intérêt d'une visualisation 3D dans ce contexte. Enfin nous utilisons l'outil de recommandation pour compléter HeloVis et explicitons son déploiement et ses fonctionnalités avant de décrire son usage pour le ROEM.

#### 6.1.1 Contexte

Nous nous sommes penché sur le cas d'application qu'est l'association d'impulsions appartenant à un même signal, pour des jeux de données contenant plusieurs signaux, que les outils de traitements n'ont pas réussi à distinguer à cause du bruit ou des erreurs qu'ils

contiennent (cf. chapitre 2). Les biais induits par les données impactent aussi la visualisation de sorte que les solutions existantes ne permettent pas de gérer ce cas d'application, tout du moins dans des durées de temps raisonnable<sup>1</sup>.

Nous allons maintenant présenter les principaux biais causés par les données. Bien que la fréquence et la DI (Durée d'Impulsion) peuvent avoir des valeurs constantes ou récurrentes, leurs valeurs sont sujettes à des erreurs et à du bruit de sorte que dissocier les impulsions de deux signaux radar en se basant sur ces attributs n'est pas toujours évident (cf. figure 6.1a). En ce qui concerne le niveau, sa variation non constante complexifie la sélection de l'association identifiée, nécessitant parfois de sélectionner impulsion par impulsion (cf. figure 6.1d), et ce indépendamment des outils de sélection les plus récents [53]. La DTOA (différence de temps d'arrivée), dont les valeurs ne sont pas forcément trop biaisées par les erreurs et le bruit, n'est pas pertinente en cas de données manquantes (cf. figure 6.1c) ou d'écoutes multiples (cf. figure 6.1b). Seul le temps n'est ni sujet à erreur, ni affecté par les données manquantes et les écoutes multiples, et contient tout de même l'information d'appartenance à un signal à travers son aspect récursif. Nous nous intéressons donc à le mettre en valeur de manière visuelle dans un environnement 3D à l'image des travaux en réalité virtuelle existants [12, 37].

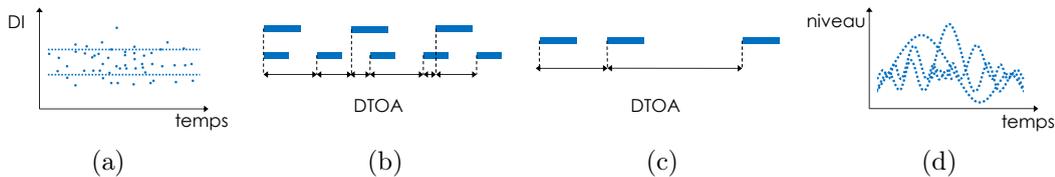


FIGURE 6.1 – Illustrations des biais induits par (a) des données erronées, (b) un mélange de données, (c) des données manquantes et (d) des variations complexes sur l'association des impulsions selon le signal radar qui les a émises

### 6.1.2 Description du principe

Le principe d'HeloVis est la combinaison d'une métaphore de représentation et d'interaction. HeloVis consiste à représenter les impulsions par des objets dont la position est définie par leur date d'arrivée sur un axe hélicoïdal. Chaque objet est ainsi positionné selon la formule suivante :

$$(y, r, \theta) = \begin{cases} t \\ R \\ 2\pi(t \bmod p) \end{cases}$$

1. Le ROEM n'a pas de contrainte de temps réel mais la quantité d'information à traiter est telle qu'elle n'est parfois pas gérable au jour le jour.

où  $(y, r, \theta)$  est la position de l'objet dans un référentiel cylindrique,  $t$  la valeur du temps,  $R$  une constante définie par la taille de la représentation et  $p$  la période d'enroulement des données définissant la torsion hélicoïdale (cf. figure 6.2). Le principe d'HeloVis est de pouvoir modifier la torsion de l'hélicoïde en interagissant avec la période. Les données ainsi représentées forment un cylindre de rayon  $R$ . Une modification de la torsion fait tourner les objets autour du cylindre de sorte que tous les objets superposés auront un delta de temps correspondant à un multiple de la période, ou autrement dit, la circonférence de cylindre équivaudra à la période. Dans le cas de l'usage d'HeloVis pour un fichier contenant un signal ayant une PRM (Période de Répétition du Motif) constante, quant à force d'exploration la période équivaudra à la PRM du signal ou à un de ses diviseurs, on distinguera sur le cylindre une pile d'objets correspondant à toutes les impulsions ayant des valeurs de temps égales modulo la période, et donc correspondant principalement à des impulsions appartenant au signal recherché (cf. figure 6.3). Un fichier contenant plusieurs signaux permettra autant de détections que de signaux, mais à des valeurs de périodes différentes (cf. figure 6.4).

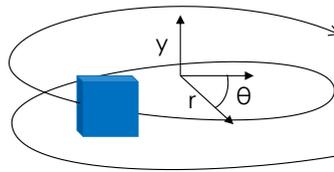
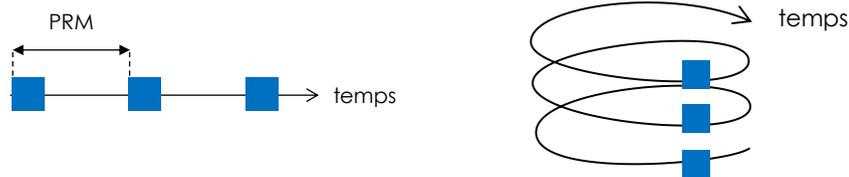


FIGURE 6.2 – Un objet (cube) représenté sur une hélicoïde et décrit par sa position dans un repère cylindrique



(a) temps linéaire

(b) temps hélicoïdal pour  $p = \text{PRM}$

FIGURE 6.3 – Différentes représentations d'un signal ayant une PRM constante. Pour une période d'enroulement égale à la PRM du signal on distingue une pile d'impulsions sur la représentation hélicoïdale.

Dans le cas d'un signal ayant un motif de longueur supérieure à une impulsion, il apparaîtra autant de piles que d'impulsions dans le motif (cf. figure 6.5) et en cas de données manquantes, les piles seront incomplètes (cf. figure 6.6) sans que cela perturbe la détection d'après la loi de continuité de la Gestalt [41]. Enfin, pour toutes autres variations de PRM (linéaire, sinusoïdale, etc.) l'assemblage détecté ne sera plus une pile mais aura la forme de la courbe correspondant à la variation. D'après la loi de la bonne forme

de la Gestalt [41] la détection d'un tel motif reste facilement perceptible par l'humain, donnant à l'opérateur la possibilité de détecter les cas les plus complexes.

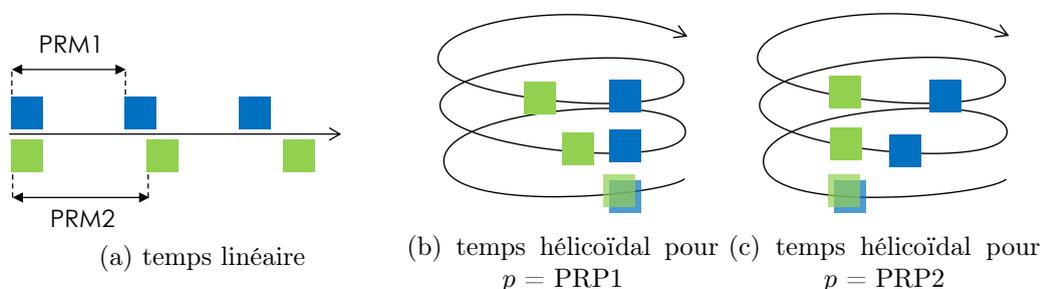


FIGURE 6.4 – Différentes représentations de deux différents signaux. Les piles d'impulsions permettant de détecter un signal sur la représentation hélicoïdale apparaissent à des périodes d'enroulement différentes qui correspondent aux PRMs de chaque signal.

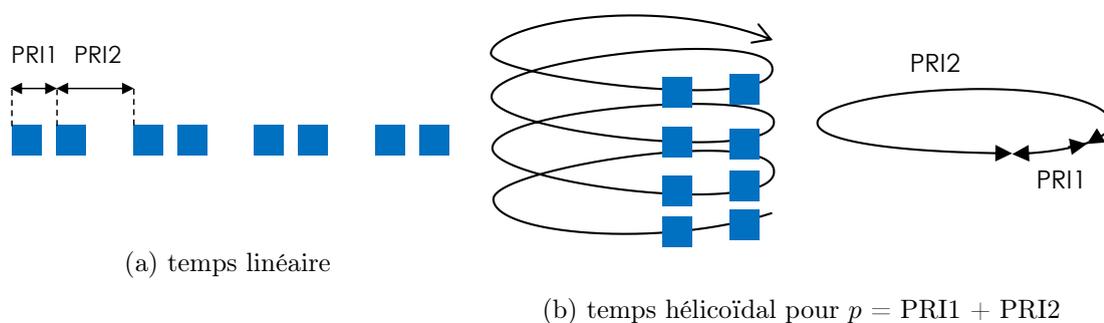


FIGURE 6.5 – Différentes représentations d'un signal dont le motif contient plusieurs impulsions. Sur la représentation hélicoïdale on distingue autant de piles que d'impulsions dans le motif.

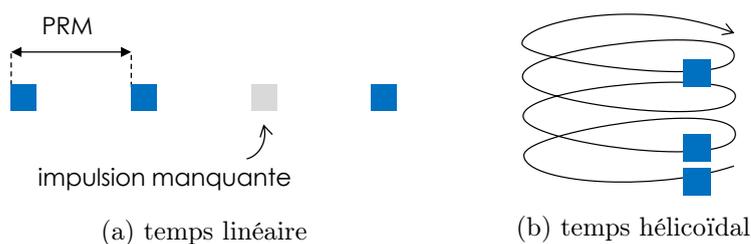


FIGURE 6.6 – Différentes représentations d'un signal ayant une impulsion manquante. Pour une période d'enroulement égale à la PRM du signal on distingue une pile sur la représentation hélicoïdale malgré l'impulsion manquante.

L'utilisation de la représentation hélicoïdale implique cependant quelques subtilités qui, sans impacter la détection, influencent la compréhension du système. Un alignement détecté ne signifie pas nécessairement que la période est égale à la PRM, la période peut également correspondre à un diviseur ou à un multiple de la PRM. Si la période correspond à  $n$  fois la PRM des impulsions détectées, l'utilisateur distinguera  $n$  piles (cf. figure 6.7). Ces  $n$  piles seront alors parfaitement réparties sur le cylindre, car dans le cas contraire, il ne s'agit non pas d'une multiplication de la PRM mais d'un signal

à  $n$  impulsions. Si la période correspond à la PRM divisée par  $n$ , il n'y aura qu'un seul alignement, mais le référentiel hélicoïde sera  $n$  fois trop torsadé (cf. figure 6.8). Un hélicoïde trop torsadé peut faire apparaître des erreurs de mesure du temps. Ces erreurs étant négligeables face à la PRM, elles n'influencent pas pour autant la détection.

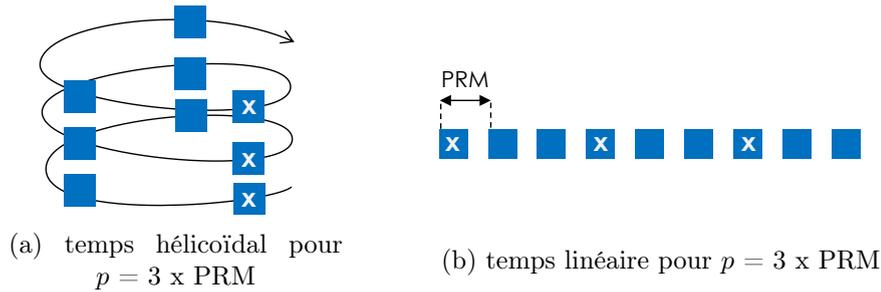


FIGURE 6.7 – Différentes représentations d'un signal. La détection de trois piles réparties de manière homogène sur la représentation hélicoïdale signifie que la période d'enroulement n'est pas égale à la PRM du signal mais à trois fois sa PRM.

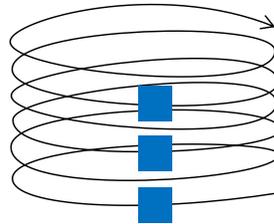


FIGURE 6.8 – Représentation d'un signal en fonction d'un diviseur de sa PRM (temps hélicoïdal pour  $p = \text{PRM} / 2$ ). Bien que la période d'enroulement ne soit pas égale à la PRM, on distingue une pile. La détection d'une pile ne signifie donc pas forcément que la période d'enroulement est égale à la PRM du signal : elle peut aussi être égale à une fraction de la PRM.

Pour conclure la description du principe, l'outil est conçu et destiné à être visualisé dans un contexte immersif pour deux raisons principales : la perception 3D (stéréoscopie et *motion parallax*) et l'immersivité. La perception 3D facilite l'association en trois dimensions [45] et donc la détection d'assemblages singuliers. L'immersivité quant à elle propose une surface d'affichage appropriée à la quantité de données à visualiser. Le principe d'HeloVis est aussi transposable en deux dimensions pour des raisons économiques et d'acceptabilité mais n'offre pas toutes les performances induites par la 3D immersive [45].

### 6.1.3 Travaux existants

L'utilisation d'une référence hélicoïdale pour mettre en évidence les récurrences temporelles existe déjà dans d'autres contextes. Le travail le plus pertinent est une représentation hélicoïdale pour la gestion de données géographiques [40]. Si cette représentation hélicoïdale est également interactive, nous permettant d'identifier des récursions basées

sur n'importe quelle période, elle est incomplète par rapport à notre proposition, ce qui la rend inutilisable pour le ROEM en l'état. Tout d'abord, elle ne permet pas d'accéder à la même quantité de données car elle est intégrée à un panneau de représentation et en tant que tel elle est limitée par la taille de l'affichage. HeloVis, de par son immersivité, permet une extension infinie de la taille d'affichage. De plus, ce travail existant ne permet d'accéder aux données que depuis l'extérieur du cylindre ce qui soulève des problèmes d'occlusion et la largeur du cylindre n'est pas assez grande pour supporter la complexité des données du ROEM.

Une autre façon de gérer les récurrences temporelles est d'utiliser des représentations en spirale qui peuvent être considérées comme des hélicoïdes déformées par la perspective. Tominski et Schumann présentent une spirale interactive pour la détection de motifs dans des données temporelles [89]. L'utilisation d'une spirale permet de placer l'utilisateur à l'intérieur des données et évite ainsi les problèmes d'occlusion mais cette hélicoïde aplatie soulève des problèmes de distorsion qui, s'ils n'entravent pas la détection du motif, peuvent conduire à une mauvaise perception de la période d'alignement. De plus, comme pour de nombreuses représentations en spirale, le travail de Tominski et Schumann est destiné à des valeurs de temps continues, ce qui n'est pas le cas des données du ROEM et qui compromet l'utilisation de la loi de continuité perceptive pour détecter des motifs.

#### 6.1.4 La visualisation 3D

La visualisation 3D n'est pas couramment utilisée dans le domaine de la visualisation d'information car l'apport de la 3D ne compense bien souvent pas ses nombreux inconvénients comme l'occlusion ou la perte d'information liée à la distorsion par la perspective [72]. La représentation des données spatiales 3D est l'un des rares domaines où les avantages de l'utilisation de la visualisation 3D l'emportent sur les inconvénients et ce, seulement pour les tâches de perception de formes [72]. Ainsi, vis-à-vis de la représentation des données abstraites, la visualisation 3D est souvent considérée comme inutile [72] ou même inefficace [100]. Que ces critiques concernent l'utilisation de la 3D aplatie ou l'utilisation de la 3D avec perception de la profondeur (stéréoscopie et *motion parallax*), ces deux méthodes nécessitent d'être distinguées. En effet, de nombreuses études comparant la 3D aplatie et la 3D en profondeur ont établi des différences de performance importantes [14, 20]. Cela ne signifie pas que la 3D en profondeur pallie tous les inconvénients de la 3D, mais cela signifie qu'elle peut potentiellement équilibrer la balance dans certain cas [13] et notamment celui qui nous concerne.

Dans le cas de la représentation HeloVis, qui a pour principal besoin perceptif d'identifier des formes, la 3D permet de respecter la métaphore de représentation qui est un repère

hélicoïdal mais aussi d'encoder un attribut supplémentaire. L'ajout de cet attribut permet d'identifier des formes en trois dimensions ce qu'il est plus performant de faire à l'aide de la 3D en profondeur [45]. En parallèle, la 3D est ici utilisée dans un contexte immersif qui augmente la surface d'affichage et donc la gestion de grandes quantités de données. Vis-à-vis des inconvénients, les problèmes d'occlusion et de perte d'information liée à la distorsion sont toujours présents. Or, d'après la loi de la bonne forme de la Gestalt, une forme géométrique simple, même couverte par une autre, sera identifiée comme une unique forme, ce qui est le cas des clusters mis en évidence par HeloVis. Vis-à-vis de la perte d'information, HeloVis permet d'identifier des formes, la distorsion de l'information n'est donc pas un inconvénient. À ce propos, certaines études indiquent que si la visualisation 3D ne permet pas une meilleure précision, elle facilite l'identification de formes [33, 58]. Ainsi, de par ses besoins, ses apports et aussi ses inconvénients HeloVis est un outil où l'usage d'une visualisation 3D en profondeur est pertinent.

### 6.1.5 Utilisation de notre outil de recommandation

Nous avons identifié chapitre 5 que notre outil de recommandation ne permettait pas de trouver de solutions à la problématique du ROEM. Néanmoins nous avons trouvé une solution impliquant la visualisation 3D et l'immersivité qui consiste à encoder les valeurs temporelles des données dans un repère hélicoïdal. Cette solution ne concerne que les valeurs temporelles, il nous faut donc identifier un moyen de représenter les autres attributs de la donnée. Pour cela nous avons utilisé l'outil de recommandation de manière simplifiée. Si l'encodage hélicoïdal gère la complexité des tâches et l'immersivité gère la quantité de données, la problématique du ROEM peut se ramener à une problématique simplifiée en faisant abstraction de ces deux éléments.

Une partie de la conception ayant déjà été contrainte par la représentation hélicoïdale nous souhaitons donc une recommandation uniquement vis-à-vis de la consolidation de l'association à l'aide des attributs de fréquence, de niveau ou de DI. L'outil de recommandation fonctionnant sur une problématique complète et non seulement une partie d'une problématique, nous avons explicité toute la problématique que résout la représentation hélicoïdale (incluant l'attribut temps bien que nous sachions déjà comment nous souhaitons l'encoder) et n'avons choisi que les résultats compatibles avec la représentation hélicoïdale (c'est-à-dire encodant le temps en position). Nous avons ainsi défini une problématique contenant deux attributs temps et choisi les solutions qui les encodent en position pour être conforme avec la représentation hélicoïdale qui représente le temps en hauteur et en azimuth (cf. code source 6.1). Le résultat choisi met en avant l'usage de la couleur, de la position et de la séparation temporelle des attributs pour encoder les attributs supplémentaires. HeloVis propose donc d'encoder les attributs de niveau,

DI et fréquence à l'aide de la couleur et de la position en profondeur de rayon, tout en permettant une modification dynamique de ces encodages.

Code source 6.1 – Usage de l'outil de recommandation pour la conception d'HeloVis

```
% Requête
attribut(temps1, quantitatif, referentiel).
attribut(temps2, quantitatif, referentiel).
attribut(frequence, quantitatif, referentiel).
attribut(niveau, quantitatif, caracteristique).
attribut(di, quantitatif, caracteristique).
activite(grouperImpulsions, association, moyen, none, multidimensionnelle,
[attrSupplementaire]).
problematique(analyseRoem, ecranStandard, novice, [grouperImpulsions]).

getRepresentation(R, analyseRoem).

% Resultat
R = ...;
R = [[(temps1, position), (temps2, position), ([frequence, niveau, DI],
position), ([frequence, niveau, DI], couleur)]];
R = ...;
```

### 6.1.6 Dispositif utilisé

HeloVis a été déployé sur un casque de réalité virtuelle HTC Vive, accompagné de deux manettes. Le dernier prototype d'HeloVis ayant été conçu à des fins d'évaluation, l'interaction y est la plus simplifiée possible. Cela diminue les possibilités d'interaction mais facilite l'apprentissage. HeloVis n'utilise ainsi que trois des actionneurs des manettes : le *pad*, le bouton " menu " et la gâchette (cf. figure 6.9). Ces trois actionneurs permettent de réaliser des actions génériques potentiellement réalisables avec un autre dispositif : valider, glisser et déposer, balayer, etc. HeloVis n'étant pas lié à un dispositif en particulier nous nous baserons sur ces actions abstraites pour décrire son fonctionnement dans la suite de ce document.

### 6.1.7 Fonctionnalités et interactions

Afin de permettre à l'utilisateur de mener à bien l'analyse ROEM, HeloVis propose un certain nombre de fonctionnalités. Ces fonctionnalités sont accessibles via des interactions



FIGURE 6.9 – Schéma représentant les actionneurs des manettes de l'HTC Vive utilisées pour HeloVis

avec le monde virtuel au moyen d'interacteurs virtuels, un laser et un curseur, qui sont mappés sur des dispositifs physiques. Le laser correspond à un rayon qui permet de désigner des objets à distance, alors que le curseur est une sphère permettant de désigner des objets proches. Afin de permettre de nombreuses interactions, la taille du curseur est modifiable à l'aide d'une interaction de balayage (mappée sur le *pad*), proche de la manipulation directe.

La première fonctionnalité d'HeloVis est de pouvoir modifier progressivement la période d'enroulement des impulsions pour pouvoir explorer les données et détecter des singularités dans les valeurs de temps (cf. figure 6.10). Cette fonctionnalité est accessible via deux interactions : une modification continue, activable et désactivable par une pression et un relâchement, et une modification suivie, commandée par un balayage horizontal dans le sens où l'on veut faire tourner les impulsions. Ces modifications permettent des retours visuels permanents, idéals pour l'exploration. Dans le prototype que nous avons déployé, la modification suivie se fait par des balayages sur le *pad* de la manette de la main non dominante, permettant respectivement de diminuer ou d'augmenter la période (le mouvement horizontal est défini par le sens dans lequel vont tourner les impulsions). La modification continue, quant à elle, se fait à l'aide d'un appui sur les bords droit et gauche de ce même *pad* (à nouveau en respectant le sens dans lequel les impulsions tournent). Ces différentes interactions, en plus de modifier l'enroulement, mettent à jour la valeur de la période affichée sur l'interacteur (manette).

La modification de la période est aussi possible de manière indirecte, en multipliant ou divisant la période d'enroulement par une valeur définie. Cette fonctionnalité permet notamment de gérer le cas où la période est égale à  $n$  fois la PRM. Elle est accessible via un panneau contenant des boutons arrangés comme pour une calculatrice (cf. figure 6.11). L'interaction avec ce panneau se fait par pointage et validation à l'aide d'un laser dont



FIGURE 6.10 – Alignements observables sur HeloVis indiquant la présence d’un signal radar

la position est mappée à la position physique de la manette de la main dominante et la validation à l’appui sur la gâchette.

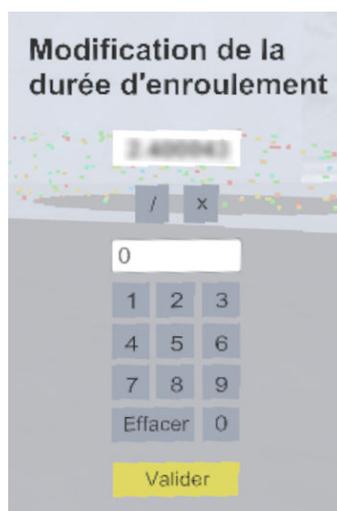


FIGURE 6.11 – Panneau permettant la modification indirecte de la période d’enroulement. Son utilisation consiste à désigner l’action que l’on souhaite faire (diviser ou multiplier) puis à sélectionner à l’aide des touches numériques la valeur que l’on souhaite appliquer à la période et enfin valider cette opération à l’aide de la touche « valider » (en jaune sur cette image).

HeloVis permet aussi la modification des encodages visuels préétablis (couleur et profondeur du rayon). Il est ainsi possible de décider lequel de la DI, la fréquence ou le niveau encode la couleur et si la profondeur du rayon est fixe, encode la fréquence ou encode le niveau. Les interactions associées à cette fonctionnalité sont très similaires à la modification indirecte de la période. Il s’agit aussi de faire usage d’un panneau et d’interagir par pointage et validation (cf. figure 6.12). Une fois l’affichage modifié, la représentation des impulsions se mettra à jour en fonction, comme l’illustrent les figures 6.13 et 6.14.

HeloVis permet aussi de se déplacer dans la vue afin de pouvoir accéder aux données plus en détail. En plus du déplacement physique limité à la zone de *tracking* du casque, HeloVis permet de se téléporter en pointant et validant la position que l’on veut attendre (mappé à la manette de la main non dominante et validé à l’aide de la gâchette). Depuis la conception d’HeloVis, la mise en place de nombreuses fonctionnalités, dont la téléportation, ont fait l’objet d’études aboutissant à des *guidelines* qu’HeloVis ne respecte pas

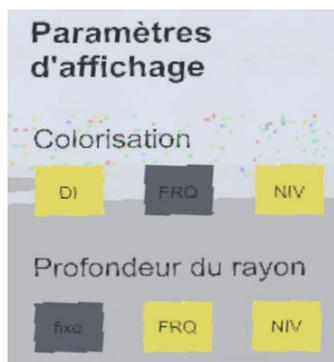


FIGURE 6.12 – Panneau permettant la modification des paramètres d’affichage. Pour modifier les paramètres d’affichage il faut sélectionner la touche correspondante. Celle-ci devient alors gris foncé et la touche précédemment enclenchée redevient jaune.

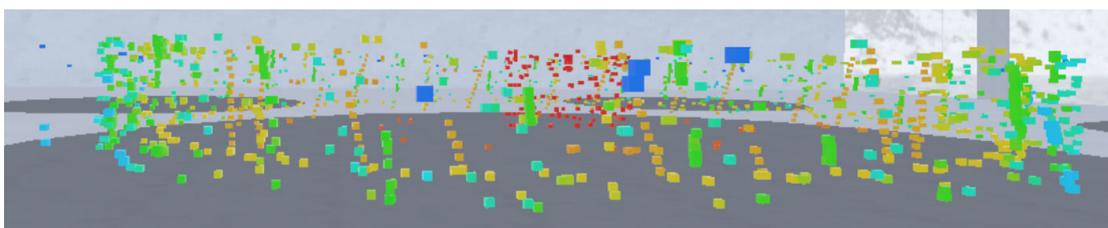


FIGURE 6.13 – Vue illustrant l’encodage de la fréquence en profondeur de rayon. Plus la valeur de fréquence d’une impulsion est importante plus elle est positionnée vers le centre de la représentation.

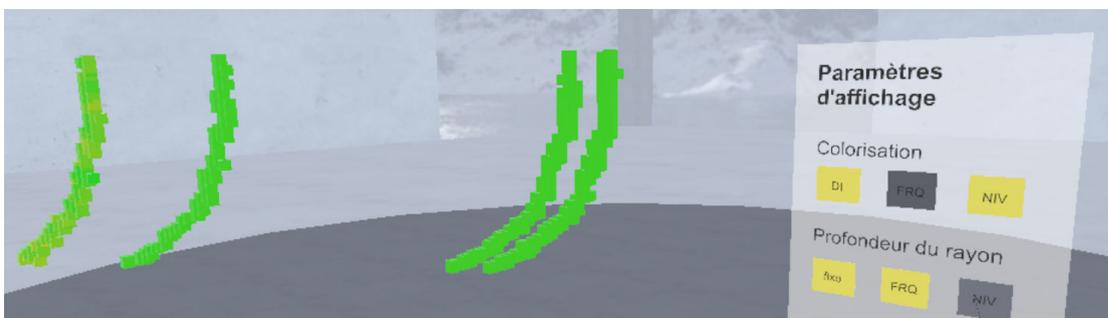


FIGURE 6.14 – Vue illustrant l’encodage du niveau en profondeur de rayon. Plus la valeur de niveau d’une impulsion est importante plus elle est positionnée vers le centre de la représentation. Cette vue permet d’identifier quatre variations de niveau de forme curviligne.

forcément [85]. Le suivi de ces *guidelines* serait facile à mettre en place mais n’est pas central pour l’analyse du potentiel d’HeloVis. En revanche, en cas d’industrialisation, il serait intéressant de s’y référer pour améliorer l’utilisabilité du système, avant même de le confronter à des utilisateurs.

Il est aussi possible d’accéder aux valeurs des attributs d’une impulsion. Pour cela l’utilisateur doit désigner l’impulsion dont il veut le détail à l’aide du curseur (cf. figure 6.15). Lorsque l’utilisateur fait rentrer en contact le curseur et l’impulsion souhaitée, un panneau contenant toutes les valeurs de l’impulsion apparaît sur l’interacteur. Dans le cas de

l'analyse ROEM il serait intéressant de pouvoir aussi accéder aux moyennes des données sélectionnées, c'est donc une piste d'amélioration de l'outil.



FIGURE 6.15 – Exemple d'accès aux valeurs d'une impulsion. Après un contact entre le curseur et une impulsion, un panneau apparaît à côté de la manette contenant les valeurs de fréquence, de niveau, de DI et de TOA de l'impulsion.

Il est possible de mesurer la différence de temps entre deux données (plus pertinents qu'une DTOA arbitraire). Pour cela l'utilisateur désigne, à l'aide du curseur, une première impulsion, la sélectionne (pression gâchette), désigne une deuxième impulsion et valide la mesure (relâchement gâchette). La mesure de la différence de temps entre les deux impulsions est illustrée par un fil allant d'abord de l'interacteur à la première impulsion, puis une fois la deuxième impulsion désignée, lie les deux impulsions. S'ajoute alors un affichage sur l'interacteur indiquant la valeur mesurée (cf. figure 6.16).



FIGURE 6.16 – Exemple de mesure de la différence de temps entre deux impulsions. Après une sélection maintenue d'une impulsion à une autre, un panneau contenant la différence de temps entre ces deux impulsions apparaît à côté de la manette.

Il est possible de sélectionner des impulsions pour les envoyer dans une vue secondaire afin de les analyser en détail. Pour cela l'utilisateur doit sélectionner à l'aide du curseur les objets qu'il veut envoyer (cf. figure 6.17). Il peut procéder à plusieurs sélections avant l'envoi. Pour cela il actionne la sélection (appui gâchette) désigne autant d'impulsions qu'il souhaite et signale la fin de la sélection (relâchement gâchette). Il peut ainsi procéder à plusieurs sélections mais n'a pas la possibilité de désélectionner. Cette fonctionnalité, accessible dans les versions précédentes d'HeloVis, a été enlevée pour réduire le nombre d'interactions possibles et ainsi faciliter l'apprentissage. Une fois l'utilisateur satisfait de

sa sélection il actionne l'envoi (appui sur le *pad* sur lequel est affiché le mot « envoyer ») et un laser apparaît. Il doit alors utiliser ce laser pour distinguer la zone où il souhaite envoyer les données. Les zones correspondant aux vues sont identifiées par des disques gris au sol. Les vues secondaires sont en périphérie de la vue principale et sont de plus petites tailles. Après avoir pointé la zone, l'utilisateur doit valider l'envoi (appui gâchette). Les impulsions sélectionnées disparaissent alors de la vue où elles étaient et réapparaissent dans la vue désignée (cf. figure 6.18).



FIGURE 6.17 – Exemple de sélection d'un groupe d'impulsions. Une fois la sélection enclenchée, le contact du curseur avec chaque impulsion la sélectionne (illustrée par la coloration en gris foncé).

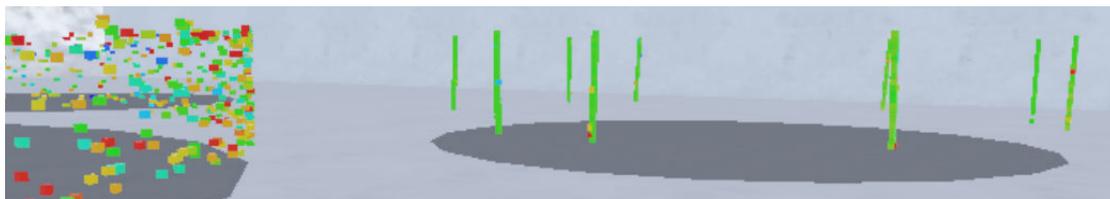


FIGURE 6.18 – Vue d'un groupe de données déplacées après une sélection. Une fois la zone d'envoi désignée les impulsions sélectionnées disparaissent de la zone où elles étaient et apparaissent dans la zone désignée.

Il est aussi possible d'archiver des données, c'est-à-dire de les faire disparaître de la représentation. Cette action irréversible est surtout destinée à l'évaluation. Les impulsions archivées sont alors stockées sous formes de logs permettant de récupérer le détail des associations identifiées par l'utilisateur. L'archivage se fait à l'aide d'interaction de pointage et de validation à l'aide du laser, sur la zone contenant les données que l'on souhaite archiver.

Afin de faciliter l'utilisabilité d'HeloVis, les interactions, les actionneurs et les encodages visuels ont été mis au point de manière cohérente. Toutes les interactions de validations liées à la sélection nécessitent l'usage de la gâchette de la manette dont on utilise le pointeur (laser ou curseur).

Les fonctionnalités associées à chaque gâchette sont définies pour être conformes aux travaux existants qui encouragent l'usage de la main dominante pour les fonctionnalités

principales et de la main non dominante pour les tâches secondaires [46]. Les fonctionnalités liées à la navigation et à la transformation de la vue (téléportation et modification directe de la période) sont ainsi réalisables à l'aide de la main non dominante, alors que les fonctionnalités d'analyses (toutes les autres) sont réalisables à l'aide de la main dominante. Les usages des interacteurs dans chaque main sont complètement indépendants. Cela permet de réaliser des actions de second plan en même temps que des actions principales. Par exemple l'utilisateur peut se téléporter ou modifier légèrement l'enroulement pour faciliter la sélection qu'il est en train de faire.

Pour pouvoir réaliser l'ensemble des fonctionnalités d'analyse uniquement à l'aide de l'interacteur de la main dominante, son usage est régi par trois modes : l'observation, la sélection et l'archivage. L'observation permet d'accéder aux valeurs des impulsions et à calculer la différence de temps entre deux impulsions. La sélection permet d'envoyer des données d'une vue à l'autre et l'archivage permet d'archiver les données. L'accès à ces différents modes est régi par un menu (accessible après pression sur le bouton « menu ») qui permet aussi l'accès aux autres fonctionnalités d'HeloVis que sont la modification non-directe de la période et la modification des paramètres d'affichage (cf. figure 6.19). Pour faciliter l'usage d'HeloVis le menu se ferme tout seul après chaque action. Afin d'identifier les boutons considérés comme menant à des actions, ces derniers sont les seuls du menu à être colorés. La validation de boutons gris, comme les chiffres de la calculatrice, n'entraîne donc pas la fermeture du menu. Enfin vis-à-vis de l'unité des couleurs, tout élément pointé est éclairci, tout élément sélectionné est coloré en gris foncé et chaque mode est associé à une couleur (bleu, vert et rouge) que prennent les pointeurs (laser et curseur) pour indiquer le mode courant.

Pour conclure, HeloVis propose des nombreuses fonctionnalités permettant de mener à bien l'analyse ROEM mais nécessite encore quelques ajustements liés à l'ajout d'outils pour une meilleure prise en compte du besoin ROEM et à la mise à jour des interactions liées à l'aspect immersif.

### 6.1.8 Implémentation

HeloVis a été implémenté à l'aide du moteur de jeu *Unity* [3]. *Unity* intègre directement l'usage du casque *HTC Vive* [1] à l'aide du *plugin SteamVR* [2]. Les différents prototypes d'HeloVis ont donc été implémenté en *C#* qui est un langage de programmation objet. L'implémentation d'un tel outil, notamment à cause de la gestion des interacteurs indépendamment l'un de l'autre, des modes et des vues synchronisées, a nécessité une architecture adaptée et l'usage de machines à états (cf. annexe B). Enfin, les différentes interactions et choix de conception ont été confrontés à de nombreux utilisateurs ayant



FIGURE 6.19 – Menu contenant les panneaux d’encodage des données (en haut à gauche) et de modification de la période (en haut à gauche) et les boutons du mode observation (en bas à gauche), du mode sélection (en bas au centre) et du mode archivage (en bas à droite)

des compétences en interaction homme-machine (notamment immersive), en ergonomie et dans le métier du ROEM. Les ressentis de ces participants mais aussi les conseils qu’ils ont exprimés nous ont permis d’améliorer le prototype.

### 6.1.9 Usage

Lorsqu’un utilisateur analyse des données ROEM à l’aide d’HeloVis il commence par s’immerger dans le monde virtuel et découvre les données réparties sur un cylindre. L’utilisateur est positionné au centre de ce cylindre duquel il peut s’éloigner, jusqu’à sortir du cylindre, pour explorer les données qui l’entourent. Une fois positionné à sa convenance, il modifie l’enroulement de la période progressivement jusqu’à détecter une forme singulière (pile, courbe sinusoïdale, etc.). Ayant détecté une forme, il peut analyser en détail les impulsions qui la composent et cherche pour cela à les sélectionner. Il sélectionne ces impulsions soit de manière grossière dans l’objectif d’éliminer le bruit ultérieurement, soit en essayant de réaliser la sélection la plus précise possible. Pour cela il modifie la coloration et la profondeur du rayon des impulsions pour identifier les impulsions aux valeurs singulières et faciliter leur sélection. Une fois la sélection faite l’utilisateur envoie les impulsions vers un espace de travail où il peut affiner sa sélection s’il ne l’a pas fait précédemment (cf. figure 6.20). Ce nettoyage se passe comme la sélection précédente à la différence que l’utilisateur renvoie les données sélectionnées dans l’espace de travail principal. Une fois les impulsions nettoyées, il utilise l’outil d’observation pour

identifier les valeurs des impulsions, utilise les différents encodages des attributs (couleur ou profondeur de rayon) pour identifier des caractéristiques singulières (la différence entre valeurs aberrantes et valeurs singulières repose uniquement sur l'expertise ou le ressenti de l'utilisateur), ou encore utilise l'outil de mesure de DTOA entre deux impulsions consécutives pour identifier la PRM du signal. Ces différentes mesures permettent à l'utilisateur d'identifier les caractéristiques du signal qu'il peut archiver pour alléger la vue avant de chercher à détecter d'autres signaux.



FIGURE 6.20 – Exemple de données envoyées dans une vue secondaire nécessitant d'être nettoyées. Les données n'appartenant pas aux alignements sont potentiellement du bruit.

### 6.1.10 Synthèse

HeloVis est un outil immersif qui combine les forces de l'existant et de l'usage des nouvelles techniques de visualisation immersive et de perception 3D pour résoudre les problématiques du ROEM. La problématique de grandes quantités de données est gérée par l'usage de l'immersif augmentant considérablement la surface d'affichage alors que les problématiques liées à l'aspect multidimensionnel des données sont gérées par l'usage de la position et de la couleur. Enfin, les contraintes de données manquantes, données erronées, et données bruitées sont gérées par l'usage d'une nouvelle métaphore de représentation, la répartition hélicoïdale et interactive du temps.

## 6.2 Évaluation

Afin de valider les différents apports attribués à HeloVis nous présentons une évaluation d'HeloVis vis-à-vis de la détection de signaux radar. Cette évaluation cherche à déterminer si HeloVis permet aux utilisateurs d'effectuer une meilleure détection, soit une meilleure association des impulsions appartenant à un même radar. Pour valider cette hypothèse, nous présentons une évaluation exploratoire comparant les performances des utilisateurs entre l'outil actuellement utilisé par les opérateurs du ROEM et HeloVis. Une meilleure détection implique un meilleur taux de détection et une meilleure qualité des détections, de sorte que nous identifions les hypothèses suivantes :

**H1** La quantité de signaux radar détectés est améliorée par l'utilisation d'HeloVis par rapport à l'outil de référence.

**H2** La qualité des signaux radar détectés est améliorée par l'utilisation d'HeloVis par rapport à l'outil de référence.

### 6.2.1 Cadre expérimental

En tant qu'évaluation visant à remettre en question l'impact d'un système sur les performances des utilisateurs, cette évaluation s'appuie sur des métriques objectives [64]. Pour maîtriser les conditions expérimentales de l'évaluation, des données démographiques et des indicateurs liés aux données ont aussi été enregistrés. Enfin, pour avoir une idée de l'acceptabilité d'HeloVis, des paramètres subjectifs sur l'expérience de l'utilisateur ont été mesurés. Ces différentes mesures ont été réalisées dans le cadre de l'expérimentation que nous présentons en commençant par décrire la procédure réalisée auprès des participants. Nous présentons ensuite les spécificités de la tâche demandée puis détaillons les conditions expérimentales, les caractéristiques des participants et le type des données utilisées.

#### 6.2.1.1 Procédure

La même procédure a été suivie pour chaque participant. L'évaluateur a souhaité la bienvenue aux participants et leur a présenté le fonctionnement de l'évaluation qu'ils ont acceptée en signant une attestation. Il leur a ensuite demandé de remplir un questionnaire démographique indiquant leur âge, leur genre, leur travail (militaire ou civil), leur expertise sur le ROEM et leur expertise sur les dispositifs immersifs. Ensuite, l'évaluateur leur a demandé de suivre la même procédure sur les deux systèmes dans un ordre différent d'un participant à l'autre. Les participants ont d'abord appris à utiliser le système sur un ensemble de données de formation. L'évaluateur leur a expliqué comment détecter un signal et ils pouvaient poser des questions. Puis, il leur a demandé d'associer de manière la plus précise possible (sans bruit) le plus de signaux possible sur un autre ensemble de données sans assistance de sa part. Enfin, il leur a demandé de remplir un questionnaire SUS [23]. Après avoir effectué cela sur les deux systèmes, l'évaluateur et les participants ont échangé sur l'évaluation et son déroulement. Cette procédure a permis d'obtenir des données démographiques, des mesures subjectives (résultats du SUS, observations sur le comportement des participants, commentaires des participants) et des métriques objectives (grâce aux logs des deux systèmes).

### 6.2.1.2 Tâche de détection d'impulsions appartenant à un même signal

Pour décrire la tâche de détection utilisée pour l'évaluation, vis-à-vis des deux systèmes évalués, nous utilisons le *nested model* de Munzner [71]. Le problème de domaine auquel nous sommes confronté est l'association des impulsions d'un même signal radar. Résoudre ce problème nécessite l'usage des opérations abstraites d'identification de données similaires, d'identification de variations singulières ou de valeurs de temps récurrentes, et enfin de corrélation. Pour effectuer ces opérations, il faut utiliser différentes techniques sur chaque système. Pour l'outil de référence, il faut utiliser plusieurs vues synchronisées de diagrammes 2D sur lesquels on peut zoomer, filtrer et colorer les données pour accéder à leurs valeurs sur toute la vue (cf. figure 6.21). Pour HeloVis, il faut évoluer dans un référentiel hélicoïdal, interagir avec la période d'enroulement pour détecter des formes singulières et modifier l'encodage des données pour accéder à différents attributs. Pour pouvoir acquérir des métriques nécessaires à l'analyse des résultats, il faut aussi l'opération abstraite de sélection qui consiste à colorier les impulsions dans l'outil de référence et à les envoyer dans un espace de travail et les archiver dans HeloVis.

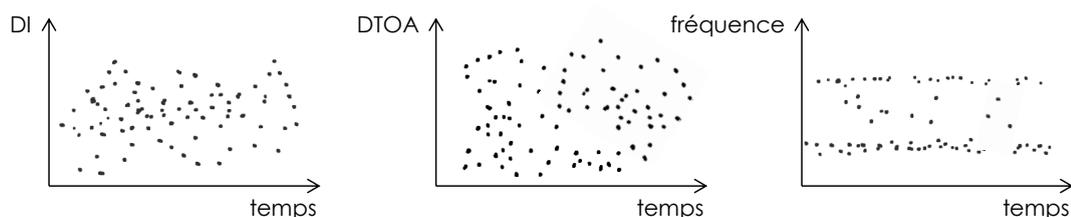


FIGURE 6.21 – Illustration de l'outil de référence contenant trois graphiques 2D encodant respectivement en fonction du temps la DI, la DTOA et la fréquence

Le nombre de détections donne une première métrique vis-à-vis de H1 et les impulsions contenues dans chaque association donnent des informations vis-à-vis de H2. Avant l'évaluation, chaque impulsion des données utilisées a été associée à un signal radar à l'aide d'un expert du ROEM de sorte que pour chaque détection le nombre d'impulsions appartenant à chaque signal était connu. Pour chaque association, le signal le plus représenté a été considéré comme le signal ciblé. Le rapport entre les impulsions qui n'appartiennent pas au signal ciblé et le nombre d'impulsions de l'association a fourni une métrique sur le pourcentage de bruit et le rapport entre les impulsions du signal ciblé et la quantité totale d'impulsions contenue dans ce signal a fourni une métrique sur le pourcentage de sélection. Bien que le temps et le taux d'erreur auraient permis de confronter nos hypothèses, ils auraient également été influencés par la qualité de l'interaction dont notre évaluation fait ici abstraction. Pour la même raison, l'évaluation ne comprend pas de contrainte temporelle.

### 6.2.1.3 Dispositifs utilisés

L'évaluation a été effectuée sur deux dispositifs différents : un ordinateur standard sur lequel a été utilisé le système de référence, et un ordinateur portable, plus performant, couplé à un casque immersif pour utiliser HeloVis. L'ordinateur standard était composé d'une unité centrale, d'une souris, d'un clavier et d'un écran 24 pouces de résolution 1920x1080 pixels. L'unité centrale avait 8 Go de mémoire vive, un processeur *Intel Core i7* et utilisait le système d'exploitation *Windows 7* (64-bit). Cela permettait une utilisation du système de référence dans de bonnes conditions.

L'ordinateur portable était couplé à un casque immersif *HTC Vive*, avec ses deux manettes et ses deux capteurs de positions. Il avait 32 Go de mémoire vive, un processeur *Intel Core i7*, une carte graphique *Nvidia 980M* (1536 cœurs *CUDA*) et utilisait le système d'exploitation *Windows 8* (64-bit). Le casque immersif avait une résolution de 2160x1200 pixels qui offrait un champ de vision horizontal de 110 degrés. Ces différentes caractéristiques permettaient une utilisation d'HeloVis dans de bonnes conditions, c'est-à-dire avec un rafraîchissement d'image à 90 Hz.

### 6.2.1.4 Participants

Onze participants âgés de 34 à 52 ans ont été recrutés pour effectuer l'évaluation. Parmi les participants, les femmes étaient sous-représentées (1/11), mais cela reflète la réalité du ROEM. La moitié des participants étaient des militaires (5/11) et la moitié d'entre eux étaient des ingénieurs civils (6/11). La plupart d'entre eux travaillaient dans le domaine du ROEM (8/11) et les autres travaillaient dans le domaine connexe qu'est la Guerre Électronique (GE). En ce qui concerne leur niveau d'expertise, la moitié d'entre eux étaient des experts confirmés, capable d'associer les signaux radar les plus complexes (6/11) et la moitié d'entre eux avaient une connaissance et une compréhension complètes du domaine, mais pas l'expérience d'associer tous les signaux radar (5/11), et cela indépendamment de leur profession. Enfin, seuls quelques-uns avaient une expérience vis-à-vis des appareils immersifs (3/11). Cet ensemble de participants avait les connaissances et l'expérience nécessaires pour représenter les utilisateurs finaux d'HeloVis.

### 6.2.1.5 Données

Le même ensemble de données a été utilisé sur les deux systèmes pour supprimer le facteur de variation induit par l'utilisation de différents ensembles de données, mais ainsi, les participants ont dû effectuer l'évaluation du deuxième système sur un ensemble de données connu. Afin de réduire le biais que cela implique, l'ordre dans lequel les systèmes

ont été évalués a été inversé d'un participant à l'autre. En parallèle, les métaphores de représentation sont tellement différentes qu'il est difficile de faire le rapprochement d'un système à l'autre. En outre, aucune différence significative entre les évaluations ayant débutées par HeloVis et celle par l'outil de référence n'a été détectée (cf. section 6.2.2.7).

L'ensemble de données utilisées pour l'évaluation contenait vingt-cinq signaux radar différents. Une étude pilote a mis en avant le fait que la détection de tous les signaux nécessitait beaucoup trop de temps comparé à la disponibilité des participants. Comme l'évaluation ne devait pas être contrainte par le temps (cf. section 6.2.1.1), le nombre de signaux radar que l'utilisateur devait détecter a été réduit. Il devait détecter des signaux radars dans une gamme de fréquences spécifique, ce qui est une requête fréquente en ROEM, réduisant le nombre de signaux radar à huit. Selon une nouvelle étude pilote, ces signaux étaient détectables en moins de 20 minutes sur les deux systèmes, permettant à l'évaluation de s'adapter au temps disponible des participants et évitant les problèmes soulevés par une utilisation trop longue du casque immersif.

Les données, c'est-à-dire les huit signaux radar utilisés pour l'évaluation, étaient des données réelles, fournies par les opérateurs du ROEM. Ces données ont été catégorisées en fonction de leur complexité de détection par un ancien opérateur militaire qui travaille actuellement à la construction de systèmes du ROEM. Cette complexité évaluée de faible à élevée comprenait deux volets : la complexité intrinsèque des caractéristiques des signaux (complexité) et l'existence de caractéristiques similaires dans d'autres signaux du jeu de données (similarité). La complexité a été catégorisée en tenant compte de la variation des paramètres des signaux (PW, fréquence, PRP, forme du niveau et longueur du motif) et de leur qualité (nombre de valeurs manquantes) (cf. tableau 6.1) alors que la similarité a été catégorisée en fonction du nombre de radars possédant une ou plusieurs caractéristiques similaires (cf. tableau 6.1).

id	complexité	similarité
1	faible	faible
2	élevée	élevée
3	moyenne	élevée
4	moyenne	moyenne
5	élevée	élevée
6	élevée	élevée
7	moyenne	moyenne
8	moyenne	faible

TABLE 6.1 – Complexité et similarité des signaux radars utilisés pour l'évaluation d'après un expert du ROEM

### 6.2.1.6 Synthèse

L'évaluation consistait à demander aux participants d'effectuer une même tâche de détection sur deux systèmes différents : HeloVis et le système actuellement utilisé par les opérateurs du ROEM. Cette évaluation a fourni des paramètres objectifs pour confronter les hypothèses posées et des métriques subjectives pour identifier l'expérience de l'utilisateur. L'évaluation a duré environ une heure par participants et a été réalisée par onze experts du ROEM sur des dispositifs permettant une exploitation optimale des deux systèmes.

## 6.2.2 Résultats

Grâce aux métriques extraites nous pouvons évaluer la quantité et la qualité des détections mais aussi l'impact de la complexité du signal radar, de l'expertise de l'utilisateur et de l'ordre d'évaluation des systèmes. Nous présentons ainsi les résultats de cette évaluation ayant pour variables indépendantes les caractéristiques des participants et des signaux radar, et pour variables dépendantes le nombre de détections, le pourcentage de bruit et le pourcentage de sélection.

### 6.2.2.1 Prétraitement

Après analyse des logs des applications nous avons constaté que certaines détections (5/96) présentaient moins de 60 impulsions pour une taille moyenne des autres détections de 300 impulsions. Ces petites détections qui ne se sont produites que sur l'outil de référence ont été la conséquence de stratégies de certains participants. Tout en affinant leur sélection, ces participants ont utilisé une autre couleur au lieu d'enlever les valeurs aberrantes de sorte que les valeurs aberrantes sont restées colorées et ont été considérées comme une détection. Comme ces détections n'étaient pas l'intention des participants, nous ne les considérons pas dans l'analyse.

### 6.2.2.2 Quantité de détection

Pour valider H1, nous comparons la quantité de détections effectuées sur chaque système. Sur 88 détections possibles (11 participants x 8 signaux radar) les participants ont détecté 53 signaux avec HeloVis et 43 avec l'outil de référence. Si nous analysons cette différence en fonction des participants ou des signaux détectés, nous ne constatons pas d'écart type important pouvant signifier une non-homogénéité des résultats (cf. tableau 6.2).

	total	par participant	par signal
<b>outil de référence</b>	43 sur 88	$4 \pm 1$ sur 8	$5 \pm 1$ sur 11
<b>HeloVis</b>	53 sur 88	$4,8 \pm 0,7$ sur 8	$6,6 \pm 0,7$ sur 11

TABLE 6.2 – Nombre de détections total, par participant et par signal sur HeloVis et sur l’outil de référence

Au vu de la taille de l’échantillon, nous ne pouvons pas attester que la différence de quantité est singulière. Par conséquent, nous ne pouvons pas valider H1 malgré de fortes suspicions de validité. Parallèlement, cela met en évidence le fait que le nombre de mesures n’est pas identique pour les deux systèmes. Pour inclure cette variable dans la suite de l’analyse et notamment dans l’analyse de la qualité des détections il nous fallait identifier la nature de la relation entre la quantité et qualité or nous ne la connaissons pas. Nous posons donc un postulat d’indépendance entre la quantité et la qualité pour pouvoir continuer l’analyse. Ainsi, à partir de ce point, nous considérons que HeloVis et l’outil de référence sont deux échantillons différents et ne tenons pas compte du nombre de détections pour la suite de l’analyse.

### 6.2.2.3 Qualité de détection

Pour valider H2, nous comparons l’outil de référence et HeloVis en fonction du pourcentage de bruit de chaque détection et du pourcentage de sélection (cf. figure 6.22). À partir de cette analyse, nous observons que le pourcentage de bruit est plus faible pour HeloVis et que le pourcentage de sélection est plus élevé pour HeloVis. Le pourcentage de bruit sélectionné indique la ré-utilisabilité de la détection. Une détection avec trop de bruit peut interdire toute utilisation postérieure, à l’image du calcul de la DTOA, et peut entraîner une mauvaise identification des caractéristiques du signal. Le pourcentage de signal sélectionné indique une meilleure connaissance du signal détecté. Plus la valeur est importante, plus les caractéristiques du signal sont connues et, accessoirement, moins il reste de bruit dans l’ensemble de données. En ce qui concerne le bruit et la sélection, HeloVis semble permettre une meilleure qualité de détection.

Pour valider H2, nous effectuons un test de Wilcoxon, car notre échantillon ne suit pas une distribution normale<sup>2</sup> invalidant l’utilisation du T-test (*student test*). Les résultats sont présentés dans le tableau 6.3. À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que l’utilisation d’HeloVis améliore la qualité de la détection en termes de pourcentage de bruit et de pourcentage de sélection, et valider H2.

2. Le test de normalité s’est avéré négatif.

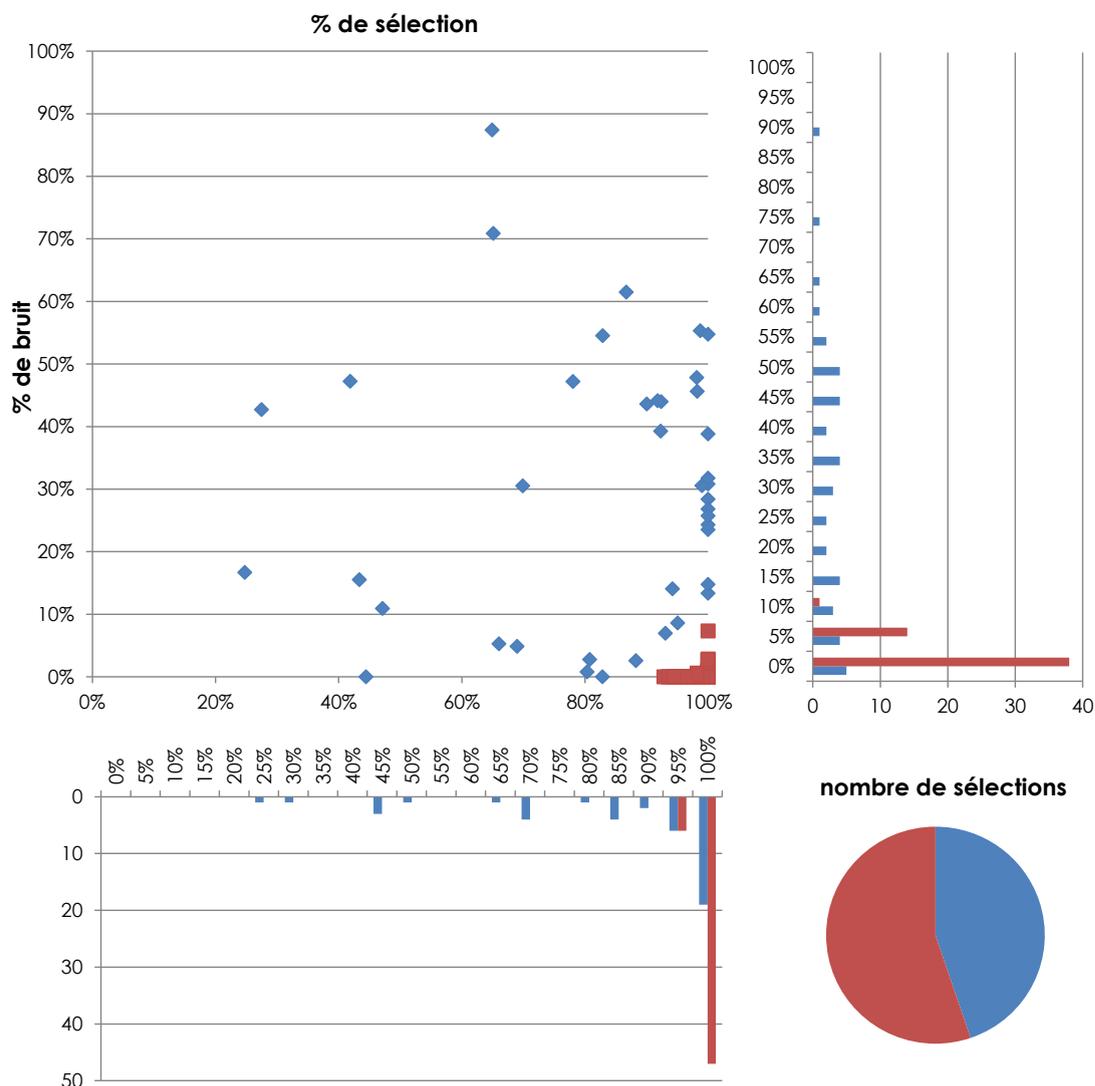


FIGURE 6.22 – Pourcentage de sélection et de bruit sur HeloVis (●) et sur l’outil de référence (●)

	sélection moy.	bruit moy.
<b>outil de référence</b>	83,4% ± 8,5%	27,8% ± 9,2%
<b>HeloVis</b>	98,5% ± 0,9%	0,4% ± 0,3%
<b>p value</b>	2,064e-6	0,0114

TABLE 6.3 – Résultat du test de Wilcoxon sur le pourcentage de bruit et de sélection sur HeloVis et l’outil de référence

### 6.2.2.4 Seuil de qualité

Au vu des valeurs de bruit nous nous demandons s’il n’est pas pertinent de mettre en place un seuil de qualité vis-à-vis du bruit car dans la pratique les résultats trop bruités ne sont pas exploitables. Or nous ne sommes pas capable de déterminer pour quel seuil de bruit le résultat n’est pas exploitable, nous nous contentons donc de réévaluer les résultats pour

différents seuils de bruit (cf. tableau 6.4). Les seuils de bruit choisis étant inférieurs au bruit de toutes les détections réalisées à l'aide d'HeloVis nous ne constatons pas d'impact sur ce dernier. En revanche vis-à-vis de l'outil de référence, cela nous permet d'identifier des résultats plus vraisemblables vis-à-vis de la qualité des détections. Le pourcentage de bruit est bien meilleur mais le pourcentage de sélection est légèrement moins bon. Ne pouvant pas pour autant établir un seuil de qualité et au vu du faible écart avec entre l'usage ou non d'un seuil, nous réalisons le reste de l'analyse avec l'ensemble des résultats sans mettre en place de seuil de bruit.

outils	bruit max.	sélection moy.	bruit moy.
outil de référence	50%	83,4% ± 8,9%	21,9% ± 7,5%
	25%	80,3% ± 9,4%	8,2% ± 3,4%
HeloVis	50%	98,5% ± 0,9%	0,4% ± 0,3%
	25%	98,5% ± 0,9%	0,4% ± 0,3%

TABLE 6.4 – Valeurs de sélection et de bruit moyen en considérant des seuils de qualité définis par un pourcentage de bruit maximum, sur HeloVis et sur l'outil de référence

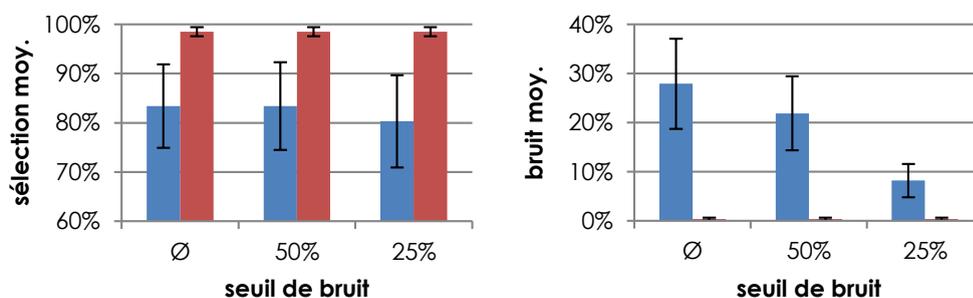


FIGURE 6.23 – Pourcentage de bruit et de sélection sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) après avoir filtré les données selon un seuil sur la quantité de bruit

### 6.2.2.5 Impact de la complexité du signal

Nous nous intéressons à la corrélation entre le pourcentage de bruit et de sélection et le taux de complexité de chaque signal sur les deux systèmes (cf. figure 6.24). Cela indique que quelle que soit la complexité du signal, HeloVis permet une détection de meilleure qualité ; que plus le signal est complexe, moins les détections sont de bonne qualité sur l'outil de référence ; et que la complexité du signal ne semble pas pour avoir un impact sur l'utilisation d'HeloVis.

En ce qui concerne la similarité des signaux (cf. figure 6.25), nous observons que quelle que soit la similarité du signal, HeloVis permet une détection de meilleure qualité ; que plus les signaux sont similaires, moins les détections ont une qualité élevée sur l'outil de référence ; et que la complexité et la similitude du signal ne semblent pas avoir un impact sur l'utilisation d'HeloVis.

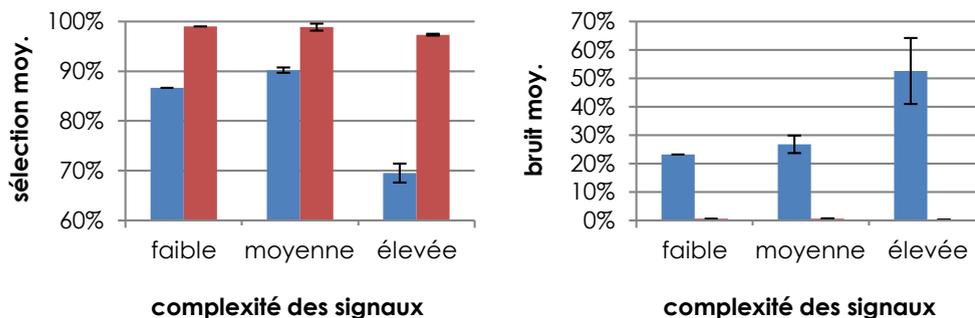


FIGURE 6.24 – Pourcentage de bruit et de sélection en fonction de la complexité du signal sur HeloVis (●) et sur l’outil de référence (●)

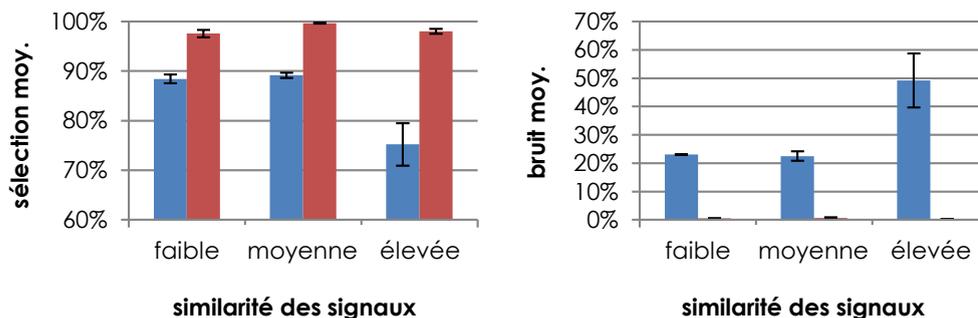


FIGURE 6.25 – Pourcentage de bruit et de sélection en fonction de la similarité des signaux sur HeloVis (●) et sur l’outil de référence (●)

### 6.2.2.6 Impact de l’expertise utilisateur

Nous essayons également de mettre en évidence la corrélation entre les pourcentages de bruit et de sélection et l’expertise de l’utilisateur (cf. figure 6.26). Cela indique que la différence de qualité entre l’outil de référence et HeloVis n’est pas affectée par l’expertise de l’utilisateur. En outre, il ne semble pas y avoir de corrélation entre le pourcentage de sélection, le pourcentage de bruit et l’expertise des utilisateurs.

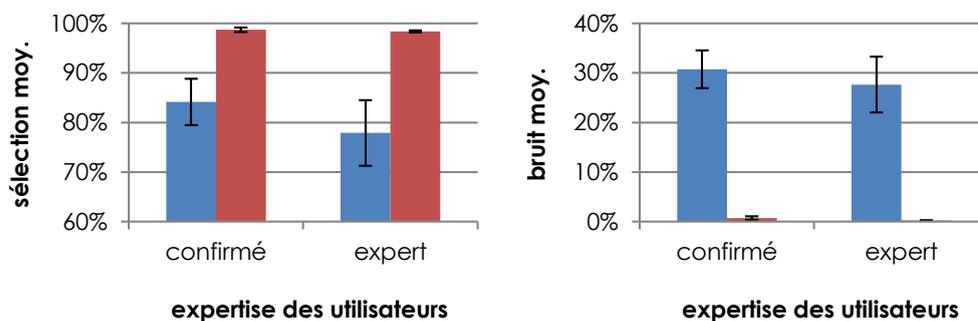


FIGURE 6.26 – Pourcentage de bruit et de sélection en fonction de l’expertise utilisateur sur HeloVis (●) et sur l’outil de référence (●)

### 6.2.2.7 Impact de l'ordre d'évaluation des systèmes

Pour identifier l'impact de l'utilisation du même ensemble de données lors de l'évaluation des deux systèmes, nous comparons la qualité des détections en fonction de l'ordre dans lequel les outils ont été utilisés (cf. tableau 6.5 et figure 6.27). D'après les valeurs de sélection et le pourcentage de bruit, il n'y a pas de différences majeures entre les résultats avec HeloVis et avec l'outil de référence en fonction de l'ordre d'utilisation. Vis-à-vis des différences au sein d'un même outil nous constatons que la sélection est meilleure pour le premier outil utilisé ce qui est contre-intuitif, en revanche la quantité de bruit sélectionnée diminue bien lors de la deuxième utilisation. Ces variations internes n'ont cependant pas d'incidences tant qu'elles sont équivalentes sur chaque outil car le changement d'ordre a été effectué de manière homogène.

	ordre	sélection	bruit
outil de référence	1	83,9% ± 8,5%	28,9% ± 8,9%
outil de référence	2	82,7% ± 8,5%	26,3% ± 9,4%
HeloVis	1	98,6% ± 0,8%	0,5% ± 0,4%
HeloVis	2	98,2% ± 1%	0,2% ± 0,2%

TABLE 6.5 – Différence de pourcentage de sélection et de bruit entre HeloVis et l'outil de référence par participants

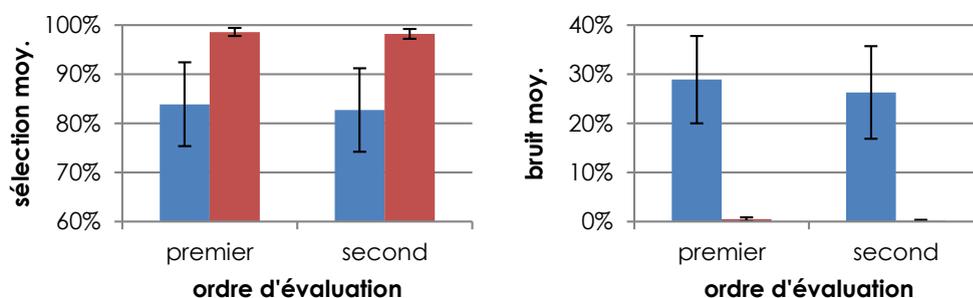


FIGURE 6.27 – Pourcentage de bruit et de sélection sur HeloVis (●) et sur l'outil de référence (●) en fonction de l'ordre dans lequel les participants les ont utilisés

### 6.2.2.8 Stratégies observées

Différentes stratégies ont été observées sur chaque système. Sur le système de référence, les utilisateurs commencent toujours en sélectionnant les données en fonction de leurs valeurs de fréquence. Ensuite, ils affinent leur sélection selon les valeurs de DI, les valeurs de DTOA ou la variation de niveau. Pour effectuer cette deuxième sélection, les participants utilisent souvent une autre couleur telle que les impulsions restantes de la première sélection forment une petite sélection qui sera classée comme une erreur lors du

traitement des résultats de l'évaluation. En raison du bruit, certains utilisateurs n'améliorent pas suffisamment ces attributs de sorte que les signaux ayant des caractéristiques similaires sont souvent sélectionnés comme un signal unique. Cela explique les forts taux de bruit de l'outil de référence. Si une telle sélection est effectuée dans un contexte opérationnel, elle ne permettra pas de caractériser le signal attendu ou pire, entraînera une fausse caractérisation. Les utilisateurs qui affinent leur sélection malgré le bruit le manipulent de deux manières différentes. Les utilisateurs moins expérimentés filtrent sur les valeurs de DTOA les plus récurrentes alors que les utilisateurs experts suppriment uniquement les valeurs inférieures à la valeur la plus récurrente et complètent leur sélection impulsion par impulsion. Dans le cas d'une impulsion manquante, la DTOA de l'impulsion correspond à un multiple de la PRM, et en supprimant des valeurs supérieures à la plage de valeurs de DTOA principale, l'utilisateur supprime éventuellement ces impulsions bien qu'elles constituent une partie du signal (cf. figure 6.28). Ce comportement explique le pourcentage de sélection plus faible de l'outil de référence mis en évidence par les résultats.

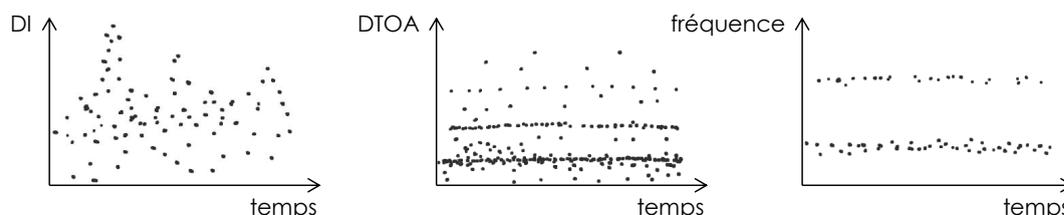


FIGURE 6.28 – Illustration de l'outil de référence dont les valeurs de DTOA semblent être impactées par des données manquantes. On constate le manque de données avec l'apparition de paliers de DTOA. Ces paliers correspondent à des multiples de la DTOA que prennent les impulsions précédant les impulsions manquantes.

Sur HeloVis, tous les utilisateurs commencent par explorer différentes valeurs de période pour détecter des alignements. Ensuite, les participants se comportent de deux manières différentes. Certains utilisateurs sélectionnent l'alignement aussi précisément qu'ils le peuvent, aidés avec la coloration ou la position sur le rayon, puis ils envoient les impulsions sur un autre espace de travail avant de les archiver. Certains participants sont très sélectifs lors de cette étape et ne prennent pas en compte les données dont les représentations diffèrent légèrement de la majorité. Les sélections effectuées avec ce comportement sont souvent exemptes de bruit mais ont aussi un pourcentage de sélection de radar plus faible. D'autres participants sélectionnent grossièrement les données, puis les envoient dans un autre espace de travail avant de les nettoyer. Dans ce cas-là les participants sont souvent plus attentifs avant d'invalider une impulsion et vérifient par exemple qu'elles restent cohérentes en PRM malgré des valeurs de fréquences ou de DI aberrantes (cf. figure 6.29). Ce comportement permet à l'utilisateur de se rendre compte que les impulsions avec des valeurs singulières font parfois partie du signal, et cela se

conclut par un taux de sélection plus important sans pour autant sélectionner plus de bruit.

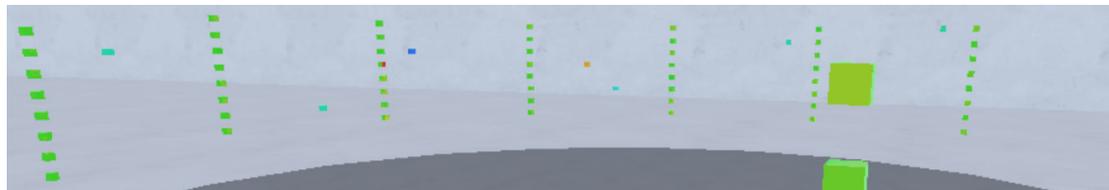


FIGURE 6.29 – Représentation hélicoïdale dont la période a été volontairement associée à une valeur différente de la PRM pour identifier les impulsions externes au signal analysé. Cette méthode permet de faire abstraction des valeurs des autres attributs encodés par la couleur (fréquence, DI, niveau) pouvant être erronées.

### 6.2.2.9 Résultats subjectifs

Au cours de l'évaluation, les commentaires des utilisateurs ainsi que les résultats de questionnaires SUS ont permis d'avoir un aperçu subjectif de l'expérience de l'utilisateur, induite par les systèmes. L'outil de référence a été considéré comme ayant des aspects mal conçus, compliquant l'interaction. Au contraire, HeloVis a été décrit comme très facile à utiliser et certains utilisateurs ont même été surpris de ce qu'ils pouvaient accomplir par rapport à ce qu'ils attendaient d'un outil 3D immersif. Certains participants, malgré un début agréable, ont été malades lors de l'utilisation d'HeloVis et n'ont donc pas eu une expérience globale agréable. En ce qui concerne les performances fournies par HeloVis, certains participants ont exprimé le fait qu'il permet de détecter des signaux radar complexes à peine détectables sur l'outil de référence, mais ont également déclaré qu'il pourrait y avoir des signaux radar complexes plus facilement détectables sur le système de référence. La synthèse de tous ces commentaires à l'égard de l'utilisabilité traduisait les résultats des questionnaires SUS : 50 pour l'outil de référence et 74 pour HeloVis. Comme nous ne voulons pas évaluer l'interaction, nous ne considérons pas ces résultats que nous savons biaisés par cette dernière. Cela indique néanmoins que HeloVis a été positivement accepté par les experts ROEM qui représentent une partie importante de la communauté du ROEM.

### 6.2.2.10 Synthèse

Nous avons identifié que HeloVis semble permettre une meilleure quantité de détection, mais nous n'avons pas pu le valider significativement. En ce qui concerne la qualité de la détection, nous avons validé le fait que HeloVis permet d'effectuer une détection de meilleure qualité. Nous avons observé différentes stratégies qui tendent à souligner que l'outil de référence, contrairement à HeloVis, ne permet pas la perception de certains

radars. Enfin, nous avons identifié à partir de métriques subjectives que les utilisateurs semblent considérer les deux systèmes comme complémentaires et apprécient l'utilisation d'HeloVis.

### 6.2.3 Discussion

Cette évaluation a été conçue pour être la plus valide possible mais elle contient encore quelques biais. La plupart d'entre eux s'expliquent par le fait que cette évaluation visait à être réalisée dans des conditions réelles. Elle visait un objectif d'exploration plutôt que des résultats effectifs. Cela explique le fait que les mesures de variables dépendantes n'ont pas été faites séparément, mélangeant mesures de quantité et de qualité. Cela explique également que l'outil actuellement utilisé ait été choisi pour faire la comparaison et non la traduction 2D de HeloVis ou une métaphore plus récente car l'outil de référence comprenait de nombreuses interactions pouvant être améliorées. Cela a entraîné une disparité d'interaction, traitée en supprimant tout biais d'interaction sur l'évaluation.

La qualité de l'échantillon a aussi été une source de biais. Le nombre de participants était assez faible car la communauté du ROEM n'est pas grande. En ce qui concerne les signaux, ils ne représentaient pas forcément tous les types de complexité existants mais c'était la contrepartie à l'usage de données réelles : ne pas maîtriser leur contenus. Étant donné que nous nous intéressons aux données rejetées par le traitement, il aurait été complexe (voire impossible) de les simuler.

Pour poursuivre ces travaux d'évaluation il serait intéressant d'évaluer HeloVis dans des conditions expérimentales plus contraintes et pour des critères plus précis comme la perception de détection. Il faudrait évaluer chaque hypothèse de manière indépendante, avec une quantité plus importante de participants et avec plus de contrôle sur les variables indépendantes telles que la complexité des signaux radar. Étant donné que les futures évaluations viseraient des critères plus précis, elles ne nécessiteront pas forcément d'être réalisées avec des utilisateurs experts, ce qui permettrait d'accéder à un nombre plus important de participants.

## 6.3 Conclusion

L'outil HeloVis est conçu pour répondre aux exigences du ROEM, qui sont : la gestion de données complexes, des tâches complexes, une grande quantité de données et potentiellement des utilisateurs novices. Ces spécificités sont telles qu'il n'existe aucune technique existante qui les satisfait tous. HeloVis s'appuie sur les travaux en recommandation de

conception issus de l'existant, les lois perceptives de la Gestalt et les aspects immersifs 3D pour fournir une nouvelle façon d'effectuer l'analyse ROEM. Le concept de visualisation hélicoïdale interactive a fait l'objet d'un dépôt de brevet [24] et d'une publication [25].

Selon une évaluation exploratoire réalisée avec des experts du ROEM, nous avons établi que HeloVis permet d'effectuer plus efficacement la première partie de l'analyse ROEM : la détection des signaux parmi les impulsions. La performance des utilisateurs avec HeloVis est supérieure en termes de quantité et de qualité de détections par rapport à l'utilisation de l'outil actuel d'analyse. En outre, les participants ont évalué positivement l'expérience utilisateur proposée par HeloVis.

# Chapitre 7

## Conclusion et perspectives

### 7.1 Conclusion

L'objectif de ces travaux était de proposer des solutions de visualisation d'informations pour les cas d'application faisant face à des problématiques combinées comme la représentation de grandes quantités de données et de données multidimensionnelles en s'appuyant sur le cas d'application existant qu'est le ROEM. L'angle par lequel était abordé ces travaux était celui de la prise en compte des biais perceptifs ainsi que l'étude des nouvelles modalités de visualisation.

Pour ce faire nous avons commencé par analyser le ROEM pour en comprendre les rouages et en extraire les problématiques auxquelles il faisait face. Nous avons ainsi obtenu les moyens de confronter les propositions visant à résoudre l'objectif de ces travaux et avons commencé par nous intéresser à la manière dont l'existant résolvait cet objectif. Nous avons ainsi découvert que si l'existant résolvait un bon nombre de problématiques, il résolvait rarement des combinaisons de problématiques et jamais l'ensemble des problématiques extraites du ROEM [27].

Ce manque de solutions ouvrait la voie à des propositions mais soulevait aussi des questions vis-à-vis de l'analyse de l'existant. Nous avons constaté qu'il n'existait pas un nombre fixe de problématiques ayant plusieurs solutions mais plutôt une multitude de problématiques ayant chacune une solution spécifique. Les solutions analysées ne correspondaient donc jamais parfaitement aux problématiques ciblées, pour autant les problématiques qu'elles résolvaient était très similaires aux problématiques ciblées. Ainsi nous avons cherché à descendre dans la description des problématiques pour proposer une manière plus méthodique d'identifier des problématiques, pour nous permettre d'accéder à toutes les représentations résolvant, même partiellement, des problématiques choisies.

Pour cela nous avons cherché à caractériser les problématiques des représentations. Nous avons commencé par identifier les grands axes qui influencent la conception d'une représentation en nous basant sur des analyses du processus de visualisation dans lequel s'insère la représentation. Cela nous a permis de retrouver de manière théorique trois catégories de problématiques : celle liée aux types de données, celle liée au contexte d'utilisation et celle liée au besoin des utilisateurs. Nous avons ensuite détaillé ces catégories une à une à l'aide des caractérisations existantes, ce qui nous a permis d'obtenir une description complètes des différentes problématiques menant à la construction des représentations [26].

En décrivant un ensemble conséquent de représentations à l'aide de cette caractérisation nous avons accès à un nombre important de représentations pour chaque aspect des problématiques. Nous nous sommes ainsi demandé si nous ne pouvions pas détailler de la même manière les composants des représentations pour identifier des relations entre aspects des problématiques et composants des représentations. Une telle mise en relation permet de reconstruire une représentation à partir d'une problématique mais aussi d'identifier les combinaisons de problématiques n'ayant pas de solutions, orientant ainsi l'approfondissement des recherches.

Nous avons donc commencé par décrire les différents composants constituant les représentations puis nous avons mis en place un système de recommandation des représentations basé sur la description des problématiques et des composants d'un nombre important de représentations. Une fois les relations identifiées, la recommandation correspondait uniquement à rassembler les composants en fonction d'une problématique choisie.

La mise en place de l'outil de recommandation et l'identification des questions à approfondir ont mis en avant le besoin d'aller chercher des solutions dans des pratiques de visualisation relativement récentes. Nous nous sommes ainsi intéressé à l'usage de la visualisation 3D et à son apport pour résoudre des combinaisons de problématiques de visualisation. En étant conscient des limites de la visualisation 3D identifiées par différentes études, mais en justifiant son intérêt pour nos travaux, nous avons proposé HeloVis, un outil de visualisation 3D immersif. HeloVis, dont le principe a fait l'objet d'un dépôt de brevet [24], est une représentation hélicoïdale interactive se basant sur les biais perceptifs des utilisateurs pour résoudre un cas d'application du ROEM combinant les problématiques de grandes quantités de données, de données multidimensionnelles, de tâches complexes et d'utilisateurs novices. Nous avons évalué l'apport d'HeloVis de manière exploratoire, pour en conclure qu'il améliore nettement les performances de l'utilisateur en termes d'efficacité et d'efficience et s'insère donc dans la lignée des travaux visant à promouvoir l'usage de la visualisation 3D.

Les différentes représentations pour le ROEM mises au point au cours de ces travaux ont permis d'enrichir les réflexions sur les nouvelles générations d'outils proposés par Thales Systèmes Aéroportés. Parmi eux HeloVis fait d'ailleurs l'objet d'études en vue d'une industrialisation.

## 7.2 Perspectives techniques

Les perspectives techniques de ces travaux concernent l'outil de recommandation, la représentation HeloVis et les différents travaux annexes ayant conduit à des représentations pour le ROEM. Vis-à-vis de l'outil de recommandation il faudrait consacrer du temps à l'amélioration de son fonctionnement en le confrontant notamment à un nombre conséquent de problématiques. Vis-à-vis de l'outil HeloVis il faudrait en améliorer l'utilisabilité pour répondre à la demande industrielle. Et enfin, vis-à-vis des outils ou méthodes mises en place pour le ROEM ou la gestion de grandes quantités de données il faudrait évaluer ces outils et les diffuser pour identifier leur potentiel.

## 7.3 Perspectives scientifiques

Les perspectives à court terme vont de pair avec les perspectives techniques. Vis-à-vis de l'outil de recommandation il faudrait, en parallèle de son amélioration, identifier une méthode d'évaluation. Vis-à-vis d'HeloVis il s'agit de définir une procédure destinée à évaluer la métaphore de visualisation et d'interaction uniquement en termes de performances perceptives.

Les perspectives à moyen terme sont la consolidation et l'évolution, en fonction de l'existant, de la caractérisation et de la base de données de recommandation, pour améliorer leur pertinence. Vis-à-vis des travaux sur HeloVis il faudrait approfondir l'analyse sur l'apport de la visualisation 3D en proposant notamment de nouvelles métaphores de visualisation 3D.

Les perspectives à long terme sont d'exploiter les travaux sur la caractérisation et l'outil de recommandation à travers une implémentation transparente, non pas pour proposer des solutions clé en main, mais pour permettre de comprendre la construction des visualisations. Cette perspective de valorisation plus que de conception permet de garder l'humain au cœur de la conception de visualisation, ce qui est à mon sens primordial. Vis-à-vis des visualisations 3D, j'espère que la proposition HeloVis s'ajoutera aux nombreux travaux ouvrant la voie vers une diversification des usages des visualisations 3D.



## Annexe A

# Code recommandation

L'outil de recommandation est basé sur deux principes : la déclaration de relations et leur association à une problématique donnée pour extraire des composants (cf. code source A.1).

Code source A.1 – Fonctions principales de l'outil de recommandation de conception. Le principe est d'associer tous les composants permettant de résoudre une problématique donnée en fonction de relations entre problématiques et composants issues de l'existant (les relations ne sont pas décrites ici).

```
% fonction de recommandation
getRepresentation(Problematique, Representation) :-
% récupérer les composants (variables visuelles) correspondants à
% la problématique par paquets d'activités
getComp1(Problematique, ReprSansVue).
% organiser les variables visuelles par vues
addView(ReprSansVue, Representation).

% récupérer les composants correspondants à une problématique
getComp1(Problematique, LLComp) :-
% identifier les paramètres de la problématique
problematique(Problematique, Dispositif, Expertise, ListeActivite),
% descendre au niveau des activités
getComp2(Dispositif, Expertise, ListeActivite, LLComp).

% récupérer les composants correspondants à des paramètres de problématique
% et à des activités
getComp2(_, _, [], []).
getComp2(Dispositif, Expertise, [Acti|LActi], [LComp|LLComp]) :-
```

```
% effectuer pour chaque activité
getComp2(Dispositif, Expertise, LActi, LComp),
% identifier les paramètres de l'activité courante
activate(Acti, Tache, Volume, Structure, Dimension, ListeAttribut),
% descendre au niveau des attributs
getComp3(Dispositif, Expertise, Tache, Volume, Structure, Dimension,
ListeAttribut, LComp).

% récupérer les composants correspondants à des paramètres de
% problématique et d'activité et à des attributs
getComp3(_, _, _, _, _, _, [], []).
getComp3(Dispositif, Expertise, Tache, Volume, Structure, Dimension,
[Attr|LAttr], [(Attr, Comp)|LComp]):-
% effectuer pour chaque attribut
getComp3(Dispositif, Expertise, Tache, Volume, Structure, Dimension,
LAttr, LComp),
% identifier les paramètres de l'attribut courant
attribut(Attr, Propriete, Nature),
% identifier un composant (variable visuelle) répondant à des
% paramètres de problématique
relation(Dispositif, Expertise, Tache, Volume, Structure, Dimension,
Propriete, Nature, Comp).
```

## Annexe B

# Architecture HeloVis

L'architecture d'Helovis a été conçue pour pouvoir gérer des modes de fonctionnement différents tout en permettant une synchronisation des vues. Pour cela le système est régi par différents états dont la gestion repose sur une machine à état. Vis-à-vis de la synchronisation, chaque changement d'état se répercute sur toutes les vues à l'aide du *pattern observer* [49].

### Machine à état

Helovis est régi par un système à état permettant de gérer les événements relatifs aux interactions en fonction de l'état du système (cf. figure B.1).

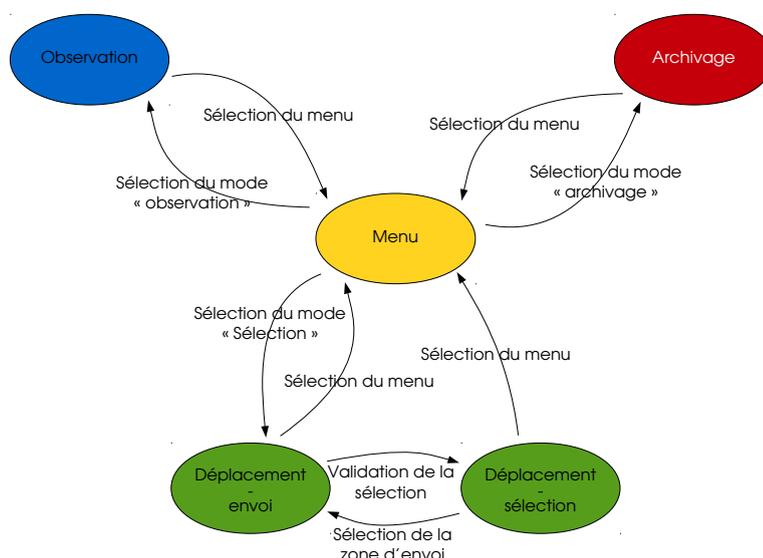


FIGURE B.1 – Machine à état régissant le système Helovis. Les couleurs correspondent aux couleurs associées aux différents modes de Helovis.

## États du système

### Observation

interacteur : curseur ;  
couleur de l'interacteur : ● ;  
éléments interactifs : données ;  
type d'interaction : *grab* ;  
panneau visible : aucun ;

### Déplacement - sélection

interacteur : curseur ;  
couleur de l'interacteur : ● ;  
éléments interactifs : données ;  
type d'interaction : sélection ;  
panneau visible : aucun ;

### Déplacement - envoi

interacteur : laser ;  
couleur de l'interacteur : ● ;  
éléments interactifs : espaces de travail ;  
type d'interaction : sélection ;  
panneau visible : aucun ;

### Archivage

interacteur : laser ;  
couleur de l'interacteur : ● ;  
éléments interactifs : espaces de travail ;  
type d'interaction : sélection ;  
panneau visible : aucun ;

## Menu

interacteur : laser ;

couleur de l'interacteur : ● ;

éléments interactifs : boutons du menu ;

type d'interaction : sélection ;

panneau visible : menu ;



# Contributions

## Publications dans des conférences internationales

- [A. Cantu](#), T. Duval, O. Grisvard and G. Coppin, "HeloVis : a Helicoidal Visualization for Signal Intelligence Analysis using 3D Immersion", *2018 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, (to appear).
- [A. Cantu](#), O. Grisvard and T. Duval, "Visual Analytics for Electronic Intelligence : Challenges and Opportunities", *2017 21st International Conference Information Visualisation (IV)*, London, 2017, pp. 422-426.
- [A. Cantu](#), O. Grisvard, T. Duval and G. Coppin, "Identifying the Relationships Between the Visualization Context and Representation Components to Enable Recommendations for Designing New Visualizations", *2017 21st International Conference Information Visualisation (IV)*, London, 2017, pp. 20-28.

## Communications lors d'événements nationaux

- [A. Cantu](#), T. Duval, O. Grisvard, and G. Coppin, "HeloVis, interactive VR visualization tool for SIGINT", *Thales AR/VR workshop 2017*, Palaiseau, 2017.
- [A. Cantu](#), O. Grisvard and T. Duval, "Recommandation de conception de visualisations pour les grandes quantités de données et les données complexes, application à la Guerre Électronique", *HE2Net 2016*, Talence, 2016.
- [A. Cantu](#), O. Grisvard and T. Duval, "Modèle de caractérisation des visualisations de données complexes en grandes quantités", *Journées Big Data Mining and Visualization 2016*, Metz, 2016.

## Brevets en cours d'examen

- [A. Cantu](#), "Procédé et système de détermination de périodicité des données". *Thales*.



# Bibliographie

- [1] Htc vive. <https://www.vive.com>. consulté le 29/11/2017.
- [2] Steamvr. <http://store.steampowered.com>. consulté le 29/11/2017.
- [3] Unity. <https://unity3d.com>. consulté le 29/11/2017.
- [4] W. Aigner, S. Miksch, H. Schumann, and C. Tominski. Time & time-oriented data. In *Visualization of time-oriented data*. Springer-Verlag London, 2011.
- [5] A. K. Al-Awami, J. Beyer, H. Strobel, N. Kasthuri, J. W. Lichtman, H. Pfister, and M. Hadwiger. Neurolines : A subway map metaphor for visualizing nanoscale neuronal connectivity. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(12) :2369–2378, Dec. 2014.
- [6] G. Albuquerque, M. Eisemann, and M. Magnor. Perception-based visual quality measures. In *Visual Analytics Science and Technology (VAST), 2011 IEEE Conference on*, pages 13–20. IEEE, 2011.
- [7] R. Amar, J. Eagan, and J. Stasko. Low-level components of analytic activity in information visualization. In *IEEE Symposium on Information Visualization, 2005. INFOVIS 2005.*, pages 111–117, Oct. 2005.
- [8] F. Amini, S. Rufange, Z. Hossain, Q. Ventura, P. Irani, and M. J. McGuffin. The impact of interactivity on comprehending 2d and 3d visualizations of movement data. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 21(1) :122–135, 2015.
- [9] G. Andrienko, N. Andrienko, J. Dykes, S. I. Fabrikant, and M. Wachowicz. Geovisualization of dynamics, movement and change : Key issues and developing approaches in visualization research. *Information Visualization*, 7(3-4) :173–180, 2008.
- [10] M. Ankerst, S. Berchtold, and D. A. Keim. Similarity clustering of dimensions for an enhanced visualization of multidimensional data. In *Proceedings IEEE Symposium on Information Visualization*, pages 52–60, 153, Oct. 1998.

- [11] C. Arbesser, O. Rafelsberger, and H. Piringer. The focus-filter widget : A versatile control for defining focus + context in 1D. In *IEEE Information Visualization*, pages 1–2, Paris, France, 2014. IEEE.
- [12] R. Arsenault, C. Ware, M. Plumlee, S. Martin, L. L. Whitcomb, D. Wiley, T. Gross, and A. Bilgili. A system for visualizing time varying oceanographic 3D data. In *OCEANS '04. MTTTS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, volume 2, pages 743–747 Vol.2, Nov. 2004.
- [13] H. Azzag, F. Picarougne, C. Guinot, G. Venturini, et al. Vrminer : A tool for multimedia database mining with virtual reality. *Processing and Managing Complex Data for Decision Support*, pages 318–339, 2005.
- [14] L.-P. Bergé, T. Duval, N. Aouf, and G. Coppin. Visualisation de nuages de points 3d acquis par un laser : impact de la vision stéréoscopique et du suivi de la tête sur une recherche de cible. In *Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine*, pages 246–251, 2016.
- [15] J. Bertin. *Sémiologie graphique*. Gauthiers-Villars, Paris,, 1967.
- [16] E. Bertini, A. Tatu, and D. Keim. Quality metrics in high-dimensional data visualization : An overview and systematization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(12) :2203–2212, 2011.
- [17] F. Bouali, A. Guettala, and G. Venturini. Vizassist : an interactive user assistant for visual data mining. *The Visual Computer*, 32(11) :1447–1463, Nov 2016.
- [18] N. Boukhelifa, A. Bezerianos, T. Isenberg, and J.-D. Fekete. Evaluating sketchiness as a visual variable for the depiction of qualitative uncertainty. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12) :2769–2778, Dec. 2012.
- [19] R. Brath. 3D infovis is here to stay : Deal with it. In *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, pages 25–31, Nov. 2014.
- [20] R. Brath and E. Banissi. The design space of typeface. In *Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Information Visualization (VisWeek 2014)*, 2014.
- [21] M. Brehmer, B. Lee, B. Bach, N. H. Riche, and T. Munzner. Timelines revisited : A design space and considerations for expressive storytelling. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23(9) :2151–2164, Sept. 2017.
- [22] M. Brehmer and T. Munzner. A multi-level typology of abstract visualization tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12) :2376–2385, Dec. 2013.

- [23] J. Brooke. Sus-a quick and dirty usability scale. *Usability evaluation in industry*, 189(194) :4–7, 1996.
- [24] A. Cantu. Procédé et système de détermination de périodicité des données, 2017.
- [25] A. Cantu, T. Duval, O. Grisvard, and G. Coppin. Helovis : a helical visualization for signal intelligence analysis using 3d immersion. In *2018 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis)*, 2018. (to appear).
- [26] A. Cantu, O. Grisvard, and T. Duval. Visual analytics for electronic intelligence : Challenges and opportunities. In *2017 21st International Conference Information Visualisation (IV)*, pages 422–426, July 2017.
- [27] A. Cantu, O. Grisvard, T. Duval, and G. Coppin. Identifying the relationships between the visualization context and representation components to enable recommendations for designing new visualizations. In *2017 21st International Conference Information Visualisation (IV)*, pages 20–28, July 2017.
- [28] S. K. Card and J. Mackinlay. The structure of the information visualization design space. In *Information Visualization, 1997. Proceedings., IEEE Symposium on*, pages 92–99, Oct. 1997.
- [29] S. K. Card, J. Mackinlay, and B. Shneiderman. *Reading in Information Visualization - Using Vision to Think*. Kaufmann, Morgan, 1999.
- [30] M. A. Carreira-Perpinán. A review of dimension reduction techniques. *Department of Computer Science. University of Sheffield. Tech. Rep. CS-96-09*, 9 :1–69, 1997.
- [31] R. Chang, M. Ghoniem, R. Kosara, W. Ribarsky, J. Yang, E. Suma, C. Ziemkiewicz, D. Kern, and A. Sudjianto. Wirevis : Visualization of categorical, time-varying data from financial transactions. In *Visual Analytics Science and Technology, 2007. VAST 2007. IEEE Symposium on*, pages 155–162. IEEE, 2007.
- [32] M. Chen and H. Jänicke. An information-theoretic framework for visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(6) :1206–1215, Nov. 2010.
- [33] G. Cliquet, M. Perreira, F. Picarougne, Y. Prié, and T. Vigier. Towards hmd-based immersive analytics. In *Immersive analytics Workshop, IEEE VIS 2017*, Phoenix, United States, Oct. 2017.
- [34] A. Cockburn, A. Karlson, and B. B. Bederson. A review of overview+detail, zooming, and focus+context interfaces. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 41(1) :2 :1–2 :31, Jan. 2009.

- [35] S. Dehaene. *The Number Sense : How the Mind Creates Mathematics*. OUP USA, 2011.
- [36] C. Donalek, S. G. Djorgovski, A. Cioc, A. Wang, J. Zhang, E. Lawler, S. Yeh, A. Mahabal, M. Graham, A. Drake, et al. Immersive and collaborative data visualization using virtual reality platforms. In *2014 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, pages 609–614, Oct. 2014.
- [37] S. Dübel, M. Röhlrig, H. Schumann, and M. Trapp. 2D and 3D presentation of spatial data : A systematic review. In *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, pages 11–18, Nov. 2014.
- [38] G. Ellis and A. Dix. A taxonomy of clutter reduction for information visualisation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(6) :1216–1223, Nov. 2007.
- [39] J.-D. Fekete and C. Plaisant. Interactive information visualization of a million items. In *IEEE Symposium on Information Visualization, 2002. INFOVIS 2002.*, pages 117–124, 2002.
- [40] J. Gautier, P.-A. Davoine, and C. Cuntly. Helical time representation to visualize return-periods of spatio-temporal events. In *19th AGILE International Conference on Geographic Information Science*, 2016.
- [41] J. J. Gibson. *The Ecological Approach to Visual Perception*. Houghton Mifflin Company, 1979.
- [42] O. Gilson, N. Silva, P. W. Grant, and M. Chen. From web data to visualization via ontology mapping. In *Computer Graphics Forum*, volume 27, pages 959–966. Wiley Online Library, 2008.
- [43] D. Gotz and Z. Wen. Behavior-driven visualization recommendation. In *Proceedings of the 14th international conference on Intelligent user interfaces*, pages 315–324. ACM, 2009.
- [44] R. Gove, J. Saxe, S. Gold, A. Long, and G. Bergamo. Seem : A scalable visualization for comparing multiple large sets of attributes for malware analysis. In *Proceedings of the Eleventh Workshop on Visualization for Cyber Security, VizSec '14*, pages 72–79, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [45] N. Greffard, F. Picarougne, and P. Kuntz. Visual community detection : An evaluation of 2D, 3D perspective and 3D stereoscopic displays. In M. van Kreveld and B. Speckmann, editors, *Graph Drawing : 19<sup>th</sup> International Symposium on Graph Drawing*, volume 7034, pages 215–225. Springer, Sept. 2012.

- [46] Y. Guiard. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action : The kinematic chain as a model. *Journal of motor behavior*, 19(4) :486–517, 1987.
- [47] W. Hadley, H. Heike, W. Charlotte, and C. Diane. Glyph-maps for visually exploring temporal patterns in climate data and models. *Environmetrics*, 23(5) :382–393, 2012.
- [48] M. Hascoet and M. Beaudouin-Lafon. Visualisation interactive d’information. *Revue I*, 1(1) :77–108, 2001.
- [49] J. Heer and M. Agrawala. Software design patterns for information visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(5) :853–860, Sept 2006.
- [50] J. Heinrich, M. Burch, and S. I. O’Donoghue. On the use of 1D, 2D, and 3D visualisation for molecular graphics. In *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, pages 55–60, Nov. 2014.
- [51] C. Helbig, H.-S. Bauer, K. Rink, V. Wulfmeyer, M. Frank, and O. Kolditz. Concept and workflow for 3D visualization of atmospheric data in a virtual reality environment for analytical approaches. *Environmental Earth Sciences*, 72(10) :3767–3780, Nov. 2014.
- [52] A. Hunt and T. Hermann. The importance of interaction in sonification. In *Proceedings of ICAD 04-Tenth Meeting of the International Conference on Auditory Display*, volume 5, pages 1–8, Sydney, Australia, 2004.
- [53] C. Hurter, S. Conversy, J.-L. Vinot, and Y. Jestin. Représentations Écologiques de données temporelles : Exemples et apports. In *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Association Francophone D’Interaction Homme-Machine, IHM ’09*, pages 33–42, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [54] C. Hurter, B. Tissoires, and S. Conversy. Fromdady : Spreading aircraft trajectories across views to support iterative queries. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15(6) :1017–1024, Nov. 2009.
- [55] A. Inselberg and B. Dimsdale. Parallel coordinates for visualizing multi-dimensional geometry. In *CG International ’87 on Computer Graphics 1987*, pages 25–44, New York, NY, USA, 1987. Springer-Verlag New York, Inc.
- [56] T. J. Jankun-Kelly, T. Dwyer, D. Holten, C. Hurter, C. Weaver, and K. Xu. Scalability considerations for multivariate graph visualization. In A. Kerren, editor, *Multivariate Network Visualization*, chapter 10, pages 207–235. Springer International Publishing, 2014.

- [57] W. Javed and N. Elmqvist. Exploring the design space of composite visualization. In *2012 IEEE Pacific Visualization Symposium*, pages 1–8, Feb. 2012.
- [58] M. S. John, M. B. Cowen, H. S. Smallman, and H. M. Oonk. The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks. *Human Factors*, 43(1) :79–98, Mar. 2001.
- [59] E. Kaya, M. T. Eren, C. Doger, and S. Balcisoy. Do 3d visualizations fail? an empirical discussion on 2d and 3d representations of the spatio-temporal data. *Proceedings of EURASIA GRAPHICS*, 2014, 2014.
- [60] D. F. Keefe, A. Gupta, D. Feldman, J. V. Carlis, S. Krehbiel Keefe, and T. J. Griffin. Scaling up multi-touch selection and querying : Interfaces and applications for combining mobile multi-touch input with large-scale visualization displays. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70(10) :703–713, Oct. 2012.
- [61] P. R. Keller and M. Keller. *Visual Cues : Practical Data Visualization*. IEEE Computer Society, Los Alamitos, USA, 1993.
- [62] S. Kubicki, S. Lepreux, and C. Kolski. RFID-driven situation awareness on tangi-sense, a table interacting with tangible objects. *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(8) :1079–1094, Dec. 2012.
- [63] K. Kurzhals and D. Weiskopf. Space-time visual analytics of eye-tracking data for dynamic stimuli. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12) :2129–2138, 2013.
- [64] H. Lam, E. Bertini, P. Isenberg, C. Plaisant, and S. Carpendale. Seven guiding scenarios for information visualization evaluation. Research Report 2011-992-04, Department of Computer Science University of Calgary, 2011.
- [65] J. Landstorfer, I. Herrmann, J.-E. Stange, M. Dörk, and R. Wettach. Weaving a carpet from log entries : A network security visualization built with co-creation. In *2014 IEEE Conference on Visual Analytics Science and Technology (VAST)*, pages 73–82, Oct. 2014.
- [66] B. Lee, P. Isenberg, N. Henry Riche, and S. Carpendale. Beyond Mouse and Keyboard : Expanding Design Considerations for Information Visualization Interactions. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12) :2689–2698, Dec. 2012.
- [67] A. Lhuillier, C. Hurter, and A. Telea. State of the art in edge and trail bundling techniques. In *Proceedings of EuroVis 2017*, pages 619–645, 2017.

- [68] J. Mackinlay. Automating the design of graphical presentations of relational information. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 5(2) :110–141, Apr. 1986.
- [69] D. McCandless. *Knowledge is beautiful*. William Collins, 2014.
- [70] J. P. McIntire and K. K. Liggett. The (possible) utility of stereoscopic 3D displays for information visualization : The good, the bad, and the ugly. In *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, pages 1–9, Nov. 2014.
- [71] T. Munzner. A nested model for visualization design and validation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 15(6) :921–928, Nov. 2009.
- [72] T. Munzner. Rules of thumb. In *Visualization analysis and design*. CRC Press, 2014.
- [73] T. Munzner. What : Data abstraction. In *Visualization analysis and design*. CRC Press, 2014.
- [74] K. Parsons. Environmental ergonomics : a review of principles, methods and models. *Applied ergonomics*, 31(6) :581–594, 2000.
- [75] D. Pfitzner, V. Hobbs, and D. Powers. A unified taxonomic framework for information visualization. In *APVis '03 : Proceedings of the Asia-Pacific symposium on Information visualisation*, volume 24, pages 57–66, Darlinghurst, Australia, Australia, 2003. Australian Computer Society, Inc.
- [76] A. Pryke, S. Mostaghim, and A. Nazemi. Heatmap visualization of population based multi objective algorithms. In S. Obayashi, K. Deb, C. Poloni, T. Hiroyasu, and T. Murata, editors, *Evolutionary Multi-Criterion Optimization : 4<sup>th</sup> International Conference, EMO 2007, Matsushima, Japan, March 5-8, 2007. Proceedings*, pages 361–375, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer Berlin Heidelberg.
- [77] H. C. Purchase, N. Andrienko, T. J. Jankun-Kelly, and M. Ward. Theoretical foundations of information visualization. In A. Kerren, J. T. Stasko, J.-D. Fekete, and C. North, editors, *Information Visualization : Human-Centered Issues and Perspectives*, pages 46–64. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [78] J. Rasmussen. Skills, rules, and knowledge ; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-13(3) :257–266, May 1983.
- [79] H. Rosling, O. Rosling, and A. Rosling Ronnlund. Gapminder : unveiling the beauty of statistics for a fact based world view. In URL <https://www.gapminder.org/data>, 2010.

- [80] H.-J. Schulz. Treevis.net : A tree visualization reference. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 31(6) :11–15, Nov. 2011.
- [81] H.-J. Schulz, T. Nocke, M. Heitzler, and H. Schumann. A design space of visualization tasks. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(12) :2366–2375, 2013.
- [82] K. Sedig, P. Parsons, and A. Babanski. Towards a characterization of interactivity in visual analytics. *Journal of Multimedia Processing and Technologies, Special Issue on Theory and Application of Visual Analytics*, 3(1) :12–28, 2012.
- [83] B. Shneiderman. The eyes have it : a task by data type taxonomy for information visualizations. In *Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages*, pages 336–343, Sept. 1996.
- [84] J.-E. Stange, M. Dörk, J. Landstorfer, and R. Wettach. Visual filter : Graphical exploration of network security log files. In *VizSec '14 : Proceedings of the Eleventh Workshop on Visualization for Cyber Security*, pages 41–48, New York, NY, USA, 2014. ACM.
- [85] C. Stein. Virtual reality design : How head-mounted displays change design paradigms of virtual reality worlds. *MediaTropes*, 6(1) :52–85, 2016.
- [86] E. Sundén, A. Bock, D. Jönsson, A. Ynnerman, and T. Ropinski. Interaction techniques as a communication channel when presenting 3D visualizations. In *2014 IEEE VIS International Workshop on 3DVis (3DVis)*, pages 61–65, Nov. 2014.
- [87] D. Thevenin and J. Coutaz. Plasticity of user interfaces : Framework and research agenda. In *Interact*, volume 99, pages 110–117, 1999.
- [88] C. Tominski, P. Schulze-Wollgast, and H. Schumann. 3d information visualization for time dependent data on maps. In *Ninth International Conference on Information Visualisation (IV'05)*, pages 175–181, July 2005.
- [89] C. Tominski and H. Schumann. Enhanced interactive spiral display. In *SIGRAD 2008. The Annual SIGRAD Conference Special Theme : Interaction ; November 27-28 ; 2008 Stockholm ; Sweden*, number 034, pages 53–56. Linköping University Electronic Press, 2008.
- [90] C. Tominski, H. Schumann, G. Andrienko, and N. Andrienko. Stacking-based visualization of trajectory attribute data. *IEEE Transactions on visualization and Computer Graphics*, 18(12) :2565–2574, 2012.

- [91] E. R. Valiati, M. S. Pimenta, and C. M. Freitas. A taxonomy of tasks for guiding the evaluation of multidimensional visualizations. In *BELIV '06 : Proceedings of the 2006 AVI workshop on BEyond time and errors*, pages 1–6, New York, NY, USA, May 2006. ACM.
- [92] S. Van den Elzen and J. J. Van Wijk. Multivariate network exploration and presentation : From detail to overview via selections and aggregations. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(12) :2310–2319, Dec. 2014.
- [93] J. J. Van Wijk. The value of visualization. In *VIS 05. IEEE Visualization, 2005.*, pages 79–86, Oct. 2005.
- [94] R. Veras and C. Collins. Prioritizing nodes in hierarchical visualizations with the tree cut model. In *IEEE Information Visualization*, pages 5–6, Paris, France, 2014. IEEE.
- [95] C. Viau and M. J. McGuffin. Connectedcharts : Explicit visualization of relationships between data graphics. *Computer Graphics Forum*, 31(3pt4) :1285–1294, 2012.
- [96] C. Viau, M. J. McGuffin, Y. Chiricota, and I. Jurisica. The flowvizmenu and parallel scatterplot matrix : Hybrid multidimensional visualizations for network exploration. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(6) :1100–1108, Nov. 2010.
- [97] P. Vickers, J. Faith, and N. Rossiter. Understanding visualization : A formal approach using category theory and semiotics. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 19(6) :1048–1061, June 2013.
- [98] M. Voigt, M. Franke, and K. Meissner. Using expert and empirical knowledge for context-aware recommendation of visualization components. *Int. J. Adv. Life Sci*, 5 :27–41, 2013.
- [99] S. Wehrend and C. Lewis. A problem-oriented classification of visualization techniques. In *Proceedings of the First IEEE Conference on Visualization : Visualization '90*, pages 139–143, 469, Oct. 1990.
- [100] C. D. Wickens, D. H. Merwin, and E. L. Lin. Implications of graphics enhancements for the visualization of scientific data : Dimensional integrality, stereopsis, motion, and mesh. *Human Factors*, 36(1) :44–61, Mar. 1994.
- [101] L. Wilkinson. *The Grammar of Graphics*. Springer-Verlag New York, 1999.

- [102] W. Willett, B. Jenny, T. Isenberg, and P. Dragicevic. Lightweight relief shearing for enhanced terrain perception on interactive maps. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 3563–3572. ACM, 2015.
- [103] J. Wood, P. Isenberg, T. Isenberg, J. Dykes, N. Boukhelifa, and A. Slingsby. Sketchy rendering for information visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 18(12) :2749–2758, Dec. 2012.



---

**Titre :** Proposition de modes de visualisation et d'interaction innovants pour les grandes masses de données et/ou les données structurées complexes en prenant en compte les limitations perceptives des utilisateurs

**Mots clés :** Data visualisation, Interfaces utilisateur, Données massives, Analyse multivariée, Perception de la profondeur, Réalité virtuelle

**Résumé :** Suite à l'amélioration des outils de capture et de stockage des données, ces dernières années ont vu les quantités de données à traiter croître énormément. De nombreux travaux, allant du traitement automatique à la visualisation d'information, ont alors été mis en place, mais certains domaines sont encore trop spécifiques pour en profiter. C'est le cas du Renseignement d'Origine ÉlectroMagnétique (ROEM). Ce domaine ne fait pas uniquement face à de grandes quantités de données mais doit aussi gérer des données et des usages complexes ainsi que des populations d'utilisateurs ayant de moins en moins d'expérience.

Dans cette thèse nous nous sommes intéressés à l'usage de l'existant et des nouvelles technologies appliquées à la visualisation pour proposer des solutions à la combinaison de problématiques comme les données en grande quantité et les données complexes. Nous commençons par présenter une analyse du domaine du ROEM qui a permis d'extraire les problématiques auxquelles il doit faire face. Nous nous intéressons ensuite aux solutions gérant les combinaisons de telles problématiques. L'existant ne contenant pas directement de telles solutions, nous nous intéressons alors à la description des problématiques de visualisation et proposons une caractérisation de ces problématiques. Cette caractérisation nous permet de décrire les représentations existantes et de mettre en place un outil de recommandation des représentations basé sur la façon dont l'existant résout les problématiques. Enfin nous nous intéressons à identifier de nouvelles métaphores pour compléter l'existant et proposons une représentation immersive permettant de résoudre les problématiques du ROEM. Ces contributions permettent d'analyser et d'utiliser l'existant et approfondissent l'usage des représentations immersives pour la visualisation d'information.

---

**Title:** Proposal of innovative visualization and interaction metaphors for huge amount of data and / or complex data by taking into account perceptual

**Keywords:** Information visualization, User interfaces, Big data, Multivariate analysis, Depth perception, Virtual reality

**Abstract:** As a result of the improvement of data capture and storage, recent years have seen the amount of data to be processed increase dramatically. Many studies, ranging from automatic processing to information visualization, have been performed, but some areas are still too specific to take advantage of. This is the case of ELeCtromagnetic INTeLLigence (ELINT). This domain does not only deal with a huge amount of data but also has to handle complex data and usage as well as populations of users with less and less experience.

In this thesis we focus on the use of existing and new technologies applied to visualization to propose solutions to the combination of issues such as huge amount and complex data. We begin by presenting an analysis of the ELINT field which made it possible to extract the issues that it must face. Then, we focus on the visual solutions handling the combinations of such issues but the existing work do not contain directly such solutions. Therefore, we focus on the description of visual issues and propose a characterization of these issues. This characterization allows us to describe the existing representations and to build a recommendation tool based on how the existing work solves the issues. Finally, we focus on identifying new metaphors to complete the existing work and propose an immersive representation to solve the issues of ELINT. These contributions make it possible to analyze and use the existing and deepen the use of immersive representations for the visualization of information.