



HAL
open science

**Formalisation et géovisualisation d'événements
historiques issus de risques naturels pour la
compréhension des dynamiques spatiales : application
aux inondations ayant touché le système ferroviaire
français**

Cécile Saint-Marc

► **To cite this version:**

Cécile Saint-Marc. Formalisation et géovisualisation d'événements historiques issus de risques naturels pour la compréhension des dynamiques spatiales : application aux inondations ayant touché le système ferroviaire français. Géographie. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAS024 . tel-01739784

HAL Id: tel-01739784

<https://theses.hal.science/tel-01739784>

Submitted on 21 Mar 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.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Modèles, méthodes et algorithmes en biologie, santé et environnement (MBS)**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Cécile Saint-Marc

Thèse dirigée par **Paule-Annick Davoine** et
codirigée par **Marlène Villanova-Oliver**

préparée au sein du **Laboratoire d'Informatique de Grenoble** et
de **SNCF Réseau, Ingénierie & Projets** et soutenue par l'ANRT
dans l'**École Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et
l'Environnement**

Formalisation et géovisualisation d'événements historiques issus de risques naturels pour la compréhension des dynamiques spatiales

**Application aux inondations ayant touché le système
ferroviaire français**

Thèse soutenue publiquement le **21 juin 2017**,
devant le jury composé de :

Prof. Dr. Freddy VINET

Professeur des Universités, Université Paul Valéry de Montpellier, Président

Prof. Dr. Sara Irina FABRIKANT

Professeur (Full Professor), UZH Zürich, Rapporteur

Prof. Dr. Thierry JOLIVEAU

Professeur des Universités, Université Jean Monnet de St-Etienne, UMR
56000 EVS, Rapporteur

Dr. Jean-Yves BLAISE

Chargé de recherche CNRS, UMR 3495 MAP, Examineur

Mme Florence MARGIOCCHI

Directrice du département Coordination Technique à SNCF Ingénierie &
Projets, Invitée

Mme Cicely PAMS CAPOCCIONI

Chef de section hydraulique à SNCF Ingénierie & Projets, Co-encadrante de
la thèse



Table des matières

Table des matières.....	3
Liste des figures.....	11
Liste des tableaux.....	20
Remerciements.....	21
Introduction générale.....	23
Partie 1 : Contexte et problématique.....	29
I/ Contexte et enjeux du système ferroviaire.....	30
1. Organisation du système ferroviaire en France.....	30
2. Le système ferroviaire face aux inondations historiques.....	31
2.1. Une histoire marquée par les inondations majeures.....	31
2.2. Les risques majeurs : des phénomènes méconnus mais pas rares.....	32
2.3. Les enjeux de recourir à l'information historique sur les inondations dans le domaine ferroviaire.....	33
3. Besoins du gestionnaire d'infrastructure ferroviaire.....	35
3.1. Méthodes d'identification des pratiques et des besoins des utilisateurs.....	35
3.1.1. Observation directe des pratiques et identification des besoins.....	36
3.1.2. Analyse des pratiques et des profils d'utilisateurs par entretiens individuels directs	36
3.1.3. Réunion d'intelligence collective sur l'organisation du système ferroviaire en cas de crise d'inondation.....	37
3.2. Les contextes d'usage d'informations historiques sur les inondations.....	39
3.3. Les besoins en informations : visualiser le récit des événements historiques.....	42
3.4. Familiarité des experts avec les cartes interactives.....	43
3.4.1. Utilisation des cartes.....	44
3.4.2. Utilisation de l'informatique.....	44
3.5. Synthèse.....	45
II/ Cartographie et risques naturels.....	46

1.	Notions générales de cartographie	46
1.1.	Les composants de la carte	46
1.1.1.	Une représentation graphique de l'espace	46
1.1.2.	La sémiologie graphique.....	48
1.1.3.	Les éléments complémentaires de la carte	52
1.1.4.	Le pouvoir des images et des cartes.....	54
1.2.	De la carte statique à la géovisualisation	58
1.2.1.	Introduction de la géovisualisation	58
1.2.2.	Usages des géovisualisations.....	59
1.2.3.	L'apport d'autres disciplines de visualisation de données.....	62
1.2.4.	Le cas de la visualisation d'entités superposés.....	66
1.3.	Synthèse	68
2.	Utilisation des cartes dans le champ des risques naturels.....	69
2.1.	Introduction à l'étude des risques naturels.....	69
2.1.1.	Les composantes du risque naturel.....	70
2.1.2.	Axiomes de la cindynique et influence en cartographie	70
2.2.	Les cartes de risques.....	72
2.2.1.	Le contenu des cartes de risques	72
2.2.2.	Une diversité d'échelles des cartes de risques	77
2.2.3.	Les usages des cartes de risque.....	79
2.2.4.	Profils d'utilisateurs	81
2.2.5.	Adapter les cartes de risques aux utilisateurs	82
2.2.6.	Synthèse	85
2.3.	Visualisations interactives et animées de risques naturels	86
	Conclusion de la Partie 1	93
	Partie 2 : Formalisation de la connaissance du domaine.....	96
	III/ Formalisation du récit des événements issus de risques dans une ontologie	97
1.	Données d'entrée	97
2.	Le choix d'une ontologie : définitions et objectifs	99
2.1.	Définitions	99
2.2.	Intérêts des ontologies	100
2.3.	Intérêts d'une ontologie pour décrire les inondations et leurs impacts sur le système ferroviaire	101

3.	Etat de l'art sur les ontologies de risques naturels et d'événements	102
3.1.	Les ontologies de risques naturels et d'inondations	102
3.2.	Les objets impactés : ontologies d'infrastructure et ontologies ferroviaires	103
3.2.1.	Ontologies génériques d'infrastructure	103
3.2.2.	Ontologies du système ferroviaire.....	104
3.3.	Description des impacts des phénomènes naturels sur les infrastructures.....	105
3.3.1.	Ontologies d'événements.....	106
3.3.2.	Ontologie des impacts d'un phénomène naturel sur une infrastructure.....	107
3.3.3.	Ontologies d'effets dominos.....	108
3.4.	Formalisation des dimensions spatiales et temporelles	109
3.4.1.	Ontologies spatiales	109
3.4.2.	Ontologies temporelles	110
3.5.	Limites des ontologies existantes	113
4.	L'ontologie IDISFER	113
4.1.	Méthode de construction de l'ontologie.....	114
4.2.	Structure générale de l'ontologie IDISFER.....	116
4.3.	Détail des ontologies d'IDISFER.....	117
4.3.1.	Ontologie relative au système ferroviaire	117
4.3.2.	Ontologie relative aux phénomènes d'inondation.....	117
4.3.3.	Ontologie relative aux incidents ferroviaires causés par les inondations	118
4.3.4.	Ontologie relative aux réactions face aux perturbations	119
4.3.5.	Propriétés associées aux classes	121
	Conclusion de la Partie 2	124
	Partie 3 : Etat de l'art : créer des cartes temporelles lisibles	126
	IV/ Adapter les cartes aux utilisateurs.....	128
1.	Théorie de la communication adaptée à la cartographie	129
2.	Application de la psychologie cognitive dans le domaine de la cartographie	133
2.1.	Perception et saillance	134
2.1.1.	Détection visuelle	134
2.1.2.	Théorie de la forme (Gestalt)	137
2.1.3.	Attention et saillance visuelle.....	140
2.1.4.	Détection pré-attentive et détection consciente	144

2.2.	Lecture et compréhension.....	146
2.2.1.	Mécanismes de compréhension.....	146
2.2.2.	Faciliter la lecture	148
2.3.	Mémoire	150
2.3.1.	Modèle modal de la mémoire	150
2.3.2.	Charge cognitive	152
2.4.	Synthèse	155
3.	Evaluation des cartes auprès des utilisateurs	157
3.1.	Principes de psychologie expérimentale	157
3.1.1.	La méthode expérimentale	157
3.1.2.	Les plans d'expérimentations	159
3.2.	Protocoles expérimentaux utilisés en cartographie	160
3.2.1.	Démarche expérimentale	160
3.2.2.	Types de tâches	162
3.2.3.	Mesures	163
3.2.4.	Participants	164
3.3.	Implications pour notre cas d'étude.....	165
4.	Synthèse	166
V/ Cartographie de données temporelles		169
1.	Formalisation du temps et des dynamiques	170
1.1.	Similarités entre le temps et l'espace.....	170
1.2.	Formalisations du temps	171
1.2.1.	Temps continu ou discret.....	171
1.2.2.	Temps linéaire, cyclique ou embranché	171
1.2.3.	Temps absolu ou relatif	172
1.2.4.	Temps emboîtés.....	172
1.2.5.	Le temps comme distance	173
1.3.	Les types de temporalités.....	173
1.4.	Dynamiques spatiales : mouvements et changements.....	174
1.5.	Synthèse	175
2.	Les représentations cartographiques du temps.....	176
2.1.	Legs méthodologiques historiques.....	176
2.2.	Règles cartographiques pour représenter le temps	180

2.2.1.	Cartographie statique du temps.....	180
2.2.2.	Cartes animées	186
2.3.	Visualisation d'informations orientées temps.....	190
2.3.1.	La représentation graphique du temps	190
2.3.2.	Liens interactifs entre carte et graphiques	193
2.4.	Synthèse	194
3.	Efficacité des représentations cartographiques du temps.....	195
3.1.	Postulats sur les associations entre temporalités, dynamiques et modes de représentation	195
3.1.1.	Modes de représentations préconisés par dynamique	196
3.1.2.	Modes de représentation préconisés par temporalité.....	197
3.1.3.	Modes de représentation préconisés par conception du temps	199
3.2.	Confrontation des cartes temporelles aux utilisateurs	199
3.2.1.	Résoudre les limites de lecture des animations	199
3.2.2.	Le contrôle des paramètres de l'animation	202
3.2.3.	La symbologie des cartes animées	203
3.3.	Comparatif des différents modes de représentation du temps	204
3.4.	Synthèse	206
4.	Le cas de la visualisation de récits d'événements	207
4.1.	Le récit	207
4.1.1.	Définition et fonctions du récit.....	207
4.1.2.	Récit scientifique et la représentation des catastrophes	208
4.2.	Approche psycho-cognitiviste des récits	209
4.3.	Cartographie de récits	211
4.3.1.	Fonctionnalités interactives des géovisualisations de récit.....	212
4.3.2.	Cartographie des relations en chaîne entre événements	219
4.4.	Synthèse	222
	Conclusion de la Partie 3	224
	Partie 4 : Contributions en géovisualisation et sur l'évaluation expérimentale en cartographie	227
	VI/ Propositions de visualisation pour explorer récits d'inondations et causalités entre événements.....	229
1.	Des objets de l'ontologie à la carte : vers des règles de représentation.....	229

1.1.	Visualisation des événements	230
1.1.1.	Une vision systémique des impacts des inondations	230
1.1.2.	Homogénéisation des granularités spatiales et temporelles	231
1.1.3.	Représentation du type d'événement	234
1.1.4.	Représentation de la date	236
1.2.	Visualisation incrémentale des événements	239
1.3.	Visualisation des relations de causalité entre événements	241
1.4.	Gestion de la diversité des échelles spatiales et temporelles	243
1.4.1.	Visualisation des relations de causalités lointaines.....	243
1.4.2.	Visualisation à petite échelle.....	245
2.	Géovisualisation dynamique du récit des événements	247
2.1.	Fonctionnalités d'exploration des événements.....	248
2.2.	Animation du récit.....	249
2.3.	L'animation atemporelle comme vecteur de liaison entre localisations	251
2.4.	Visualisation des temporalités.....	251
2.5.	Navigation à plusieurs échelles	253
3.	Synthèse	254
VII/ Evaluation expérimentale des propositions de géovisualisation		256
1.	Présentation de l'expérimentation.....	256
1.1.	Objectifs et hypothèse.....	256
1.2.	Protocole expérimental	258
1.2.1.	Participants	258
1.2.2.	Logistique	258
1.2.3.	Méthodologie	259
1.2.4.	Originalités du protocole	265
1.3.	Méthode d'analyse des résultats.....	266
1.4.	Limites de l'expérimentation identifiées a posteriori.....	266
2.	Résultats	268
2.1.	Profil des participants.....	268
2.1.1.	Caractéristiques individuelles.....	268
2.1.2.	Habitudes thématiques et techniques	269
2.2.	Efficacité dans les tâches élémentaires.....	271
2.2.1.	Interactions entre les mesures quantitatives	271

2.2.2.	Différence entre tâches de recherche d'information et de lecture des causalités .	271
2.2.3.	Influence de la dimension de l'information interrogée dans la question	274
2.2.4.	Influence de la complexité de la question.....	279
2.2.5.	Comportement lors des questions imprécises	282
2.2.6.	Influence du profil des participants.....	283
2.3.	Effets d'apprentissage et de fatigue	288
2.3.1.	Effet de l'ordre des questions	288
2.3.2.	Effet de la modalité de carte testée en premier.....	289
2.4.	Préférences des participants	292
2.4.1.	Utilisabilité des cartes interactive et dynamique	292
2.4.2.	Modalité de carte préférée.....	294
2.5.	Stratégie d'utilisation lors de la tâche complexe.....	295
2.5.1.	Fonctionnalités les plus utilisées	296
2.5.2.	Stratégies d'exploration.....	297
2.5.3.	Nature des informations synthétisées.....	298
2.5.4.	Limites de ces observations.....	300
2.6.	Retours utilisateurs sur l'interface de géovisualisation.....	301
2.6.1.	Organisation générale et navigation.....	301
2.6.2.	Visualisation de l'espace.....	303
2.6.3.	Visualisation du temps	304
2.6.4.	Visualisation des descriptions des événements	307
3.	Synthèse et discussion des résultats	308
3.1.	Une représentation des effets dominos améliorable	308
1.1.	La carte dynamique est moins efficace que la carte interactive	309
1.2.	Une exploration orientée vers la dimension spatiale	311
VIII/	Vers un protocole expérimental standardisé.....	313
1.	Quelques limites de nos analyses	313
1.1.	Caractéristiques des participants	313
1.2.	Limites de l'ordre de test	314
1.3.	Possibilité de biais lié à l'anticipation des difficultés des participants	314
1.4.	Interprétation délicate de certaines variables quantitatives.....	315
2.	De nouvelles variables utiles pour analyser les stratégies d'usage.....	315
2.1.	Apports de la durée avant le premier clic.....	316

2.2.	Apports de l'écart au nombre de clics optimal.....	316
2.3.	Apport des traces d'utilisation	317
3.	Proposition d'un protocole expérimental adapté à la géovisualisation.....	318
3.1.	Phase 1 : questionnaires préliminaires.....	319
3.2.	Phase 2 : Tâches élémentaires.....	320
3.2.1.	Plan d'expérimentation et participants	320
3.2.2.	Questions d'évaluation	321
3.2.3.	Déroulé de la phase 2	322
3.2.4.	Mesures	322
3.3.	Phase 3 : Tâche complexe.....	322
3.4.	Phase 4 : Questionnaires bilan	323
	Conclusion générale	325
	Annexes	335
	Annexe 1 : Méthode de collecte des documents d'archives.....	336
	Annexe 2 : Description de l'ontologie relative au système ferroviaire.....	340
	Annexe 3 : Elaboration d'une typologie des informations imparfaites.....	343
	Annexe 4 : Script et questionnaire oral d'expérimentation	351
	Bibliographie.....	358
	Liste des publications	382

Liste des figures

Figure 0.1. Démarche méthodologique suivie dans le travail de thèse, intégrant les utilisateurs depuis la modélisation des données jusqu'à l'usage de la carte.....	26
Figure 1.1. Photos de dommages aux ouvrages ferroviaires sur la ligne de Bordeaux à Sète, dus à l'inondation de 1999 dans l'Aude (Crédits photos : SNCF Réseau).....	32
Figure 1.2. Exemple de diagramme de séquence en UML.....	38
Figure 1.3. Exemple de généralisation cartographique (Duchêne, 2004).....	47
Figure 1.4. Exemple de deux cas de sélection d'objets géographiques par rapport à l'ensemble des objets visibles sur la photographie aérienne (image de gauche) du campus universitaire de Grenoble : tout en représentant sensiblement les mêmes objets, la carte du milieu met plutôt l'accent sur les routes et chemins, tandis que la carte de droite met en valeur les ensembles de bâtiments par établissement de rattachement (couleurs).....	48
Figure 1.5. Variables visuelles de la sémiologie graphique et efficacité selon la nature des données (Dibiase et al., 1992).....	49
Figure 1.6. Palette de choix des couleurs intégrant le modèle TSL dans le logiciel Microsoft Paint©	50
Figure 1.7. Exemple d'usage d'un symbole abstrait (étoile) indiquant un bâtiment remarquable et d'un symbole iconique (bateau) indiquant un port de plaisance (Source : geoportail.gouv.fr).....	51
Figure 1.8. Symboles iconiques figuratifs et évocateurs (Weger, 1996)	51
Figure 1.9. Exemple de carte où la légende joue un rôle majeur dans la compréhension du contenu (Source : Gustave et Pigeolet, 2015).....	53
Figure 1.10. Exemple d'éléments complémentaires ajoutés à une planche cartographique : carton de localisation (en haut à droite), projection cartographique (en bas au milieu), coordonnées géographiques (bordures de la carte de gauche), logos des producteurs de données (en bas à droite) (Saint-Marc et al., 2014).....	54
Figure 1.11. Données de référence et graphiques associés au quartet d'Anscombe	55
Figure 1.12. Exemple de carte à visée de propagande (publiée dans Gould et Bailly, 1995, p. 34).....	56
Figure 1.13. Interface de géovisualisation multi-vue (Source : outil GenGHIS) (Davoine et al., 2009).....	59
Figure 1.14. Cube des usages des géovisualisations (Maceachren et Kraak, 1997).....	60
Figure 1.15. Révision du cube des usages des géovisualisations sur la base des outils cartographiques en ligne sur internet (Davoine et al., 2015)	60

Figure 1.16. Quelques exemples de visualisation de données (Datavis)	63
Figure 1.17. a) Un exemple de méthode overview+zoom : l'application Information Mural (Jerding et Stasko, 1995) où le fragment de frise montré en haut de l'écran est localisé dans l'ensemble de la frise du bas par un rectangle rouge. – b) Un exemple de focus+context : le mur en perspective (Mackinlay et al., 1991) où la face avant du mur montre le détail d'une partie du graphique, tandis que les faces fuyant vers l'arrière permettent d'apercevoir le contexte.....	65
Figure 1.18. Vues graphiques coordonnées à la carte dans l'application OECD Regional eXplorer.....	66
Figure 1.19. a. Exemple de méthode agrégeant les points proches (Marker Clusterer). – b. Exemple de méthode de déplacement relatif des points proches (Spiderfier).	67
Figure 1.20. Extrait d'une carte météo sur le Japon. Le changement de conditions météo au cours de la journée est indiqué par des symboles iconiques, qui sont ordonnés chronologiquement de haut en bas (Tufté 1990).	68
Figure 1.21. Carte de niveau d'aléas inondation à l'échelle de la ville de Strasbourg, issue du zonage des TRI (Territoires à Risque d'Inondation) (Source : portail Géorisques).....	74
Figure 1.22. Extrait d'une carte règlementaire de PPRI sur la Saône, dans la ville de Lyon. Le niveau de risque est représenté par des aplats colorés qui figurent le croisement d'un aléa (fort, moyen, faible, exceptionnel) et d'une vulnérabilité (bâti, non bâti).	75
Figure 1.23. (A gauche) Hauteurs d'eau dans la ville de Grenoble lors de l'inondation de 1740 - (A droite) Nombre d'immeubles sinistrés lors de la crue de 1733 (Coeur, 2003).....	76
Figure 1.24. Simulation d'une crue centennale de l'ampleur de la crue de 1910 en Ile-de-France (Source : Institut d'Aménagement Urbain, EU Sequana 2016).....	77
Figure 1.25. Carte de l'aléa sismique à moyenne échelle (Source : prim.net).....	78
Figure 1.26. Carte à grande échelle de l'aléa inondation par remontée de nappe sédimentaire (source : portail Géorisques)	78
Figure 1.27. Proposition de carte de risque adaptée aux gestionnaires stratégiques (décideurs et experts des inondations) (Fuchs et al., 2009)	84
Figure 1.28. Interface d'inventaire d'événements de la base de données historique sur les inondations (Source : http://bdhi.fr).....	87
Figure 1.29. Interface de l'outil ViewExposed qui permet de visualiser les composantes de la vulnérabilité des communes aux risques d'inondation, de tempête et de coulées de boue (Opach et Rød, 2013).....	88
Figure 1.30. Visualisation des données hydro-météorologiques de l'inondation du 8 août 2007 en Suisse (Lienert et al., 2011)	90
Figure 1.31. (A gauche) Interface de visualisation des événements issus de risque dans l'outil SIHREN ; (à droite) Maquette d'une fenêtre documentaire permettant d'accéder à du contenu multimédia (Arnaud, 2009).....	91

Figure 2.1. Exemples de documents collectés dans les fonds d’archives SNCF. De haut en bas : 1) Photographie de la brèche d’Ars-sur-Moselle lors de l’inondation de décembre 1947, 2) Plan de travaux d’aménagements sur la rivière Têt (1922), 3) Extrait d’un compte estimatif de travaux de reconstruction (1915), 4) Rapport technique relatant les incidents survenus pendant l’inondation de 1947, 5) Carte des dommages aux ouvrages en terre suite à l’inondation d’octobre 1940.	98
Figure 2.2. Les types d’ontologies (Kruchten et al., 2007)	99
Figure 2.3. Exemple d’un triplet d’ontologie, incluant des classes, des individus instanciés et des propriétés.....	100
Figure 2.4. Modèle générique d’une infrastructure (Kruchten et al., 2007)	104
Figure 2.5. Modèle de l’ontologie LODE (Troncy et al., 2010)	107
Figure 2.6. Ontologie décrivant la structure d’un système, les événements dommageables et les effets dominos (Provitolo et al., 2009)	108
Figure 2.7. Modèle des concepts du standard ISO 19108 (Eurocontrol, 2012)	111
Figure 2.8. Schéma décrivant les objets de l’équipement ferroviaire, obtenu grâce à la collaboration entre experts métier	115
Figure 2.9. Modèle simplifié de l’ontologie IDISFER.....	117
Figure 2.10. Concepts extraits de l’ontologie relative aux phénomènes naturels	118
Figure 2.11. Extrait de l’ontologie relative aux incidents, illustrant les relations entre incidents origines et incidents induits	119
Figure 2.12. Ontologie relative aux perturbations ferroviaires et aux mesures de réaction mises en place	120
Figure 2.13. Typologie des imperfections des données spatio-temporelles.....	123
Figure 3.1. Scalogramme du nombre d’événements survenus par jour, au cours de l’inondation des Vosges de 1947.....	126
Figure 3.2. Chaîne de transmission de l’information dans la théorie de la communication (Shannon et Weaver, 1949)	129
Figure 3.3. Modèle du message cartographique (Muehrcke, 1978, cité par Chesneau, 2006)	130
Figure 3.4. Les six fonctions du langage (Jakobson, 1960)	132
Figure 3.5. Illusion de Zollner : les lignes obliques sont en réalité parallèles.	136
Figure 3.6. Illusion du contraste simultané : la teinte de la barre grise est la même sur toute la longueur.....	136
Figure 3.7. Illusion de modification des couleurs perçues	136

Figure 3.8. Illustration de trois caractéristiques permettant l'émergence d'une figure : a) la symétrie, b) la taille, c) l'orientation (Nicolas et al., 2007).....	138
Figure 3.9. Illustration de la loi de continuité : les points sont mentalement regroupés en alignements, formant ainsi comme deux lignes	138
Figure 3.10. Illustration de la loi de l'ensemble objectif (MacEachren, 1995, p. 76)	138
Figure 3.11. Reconstitution d'un cube imaginaire à partir de points (Ladenthin, 2008)	138
Figure 3.12. Carte mettant en avant les discontinuités de PIB entre régions dans l'Union Européenne (« Le rideau de fer économique », UMS RIATE).....	140
Figure 3.13. Représentations cartographiques favorisant l'attention sélective et l'attention distribuée (MacEachren, 1995, p. 83, 89)	142
Figure 3.14. Comparaison des résultats d'évaluation de la saillance visuelle d'une carte par les modèles automatiques de calcul SUN et iNVT (Jégou et Deblonde, 2012)	143
Figure 3.15. Illustration du dépassement des ressources mentales par la charge cognitive totale, provoquant une surcharge cognitive (d'après Khalil et al., 2005)	153
Figure 3.16. Etapes de la méthode expérimentale en psychologie (d'après Nicolas et al., 2007)	158
Figure 3.17. Modèle du processus de création de cartes impliquant les utilisateurs. Repris et complété à partir de (Graziano, 2009, p. 43) (les modifications par rapport au schéma initial sont indiquées en orange).....	167
Figure 3.18. Les treize relations d'Allen entre deux intervalles temporels (Allen, 1983) (Source image : Arnaud, 2009)	172
Figure 3.19. Groupes de représentations visuelles spatio-temporelles (Kaddouri et al., 2014)	176
Figure 3.20. Graphique du mouvement des troupes au cours de la campagne de Russie de 1812-1813 de Napoléon Bonaparte (Minard, 1869).....	177
Figure 3.21. Variations de population entre 1801 et 1881, à une granularité de 5 ans (Album de statistique graphique de 1884, publié par Palsky, 1996)	178
Figure 3.22. Observation de variables météorologiques par jour en décembre 1861 (Galton, 1863). Pour chaque groupe : Horizontalement, observations le matin, le midi et le soir respectivement ; verticalement, observation des pressions, vent et pluies, et températures.	179
Figure 3.23. Rotation des satellites de Jupiter au cours du temps (Tufté, 1990)	179
Figure 3.24. Horaires des trains sur la ligne Paris-Lyon (Marey, 1885)	180
Figure 3.25. Collections de cartes (à gauche) mises en regard de cartes statiques (à droite), ces dernières utilisant la variable taille, la valeur ou le grain pour représenter le temps (Bertin, 1967).....	181
Figure 3.26. Utilisation conjointe des variables couleur et valeur pour représenter un nombre	

important de dates (Davoine et al., 2012)	182
Figure 3.27. Carte de variation de la densité de population (Source : Cartesfrance.fr)	183
Figure 3.28. Représentations de trajectoires d'objets mobiles (Bertin, 1967).....	183
Figure 3.29. Le cube spatio-temporel (Kraak, 2003)	184
Figure 3.30. Anamorphose de la carte de France pour représenter la distance temporelle entre lieux grâce au réseau ferré en 1994 (Cauvin et al., 2008b)	185
Figure 3.31. Carte isochrone montrant les zones accessibles dans certaines plages de durées à partir du point central (Source : Isokron)	185
Figure 3.32. Classement du degré d'interactivité dans les cartes animées (Source : Klein, 2007).....	188
Figure 3.33. (à gauche) Ligne de temps sur une année, temps cyclique et temps hélicoïdal (Edsall et Peuquet, 1997) – (à droite) De haut en bas : ligne de temps montrant des quantités de plantes collectées par an et diagramme en fleur montrant les quantités par mois de l'année, dans l'application HerbariaViz (Auer et al., 2010)	191
Figure 3.34. Un exemple de Ring maps (ou Data rose), montrant le nombre de crimes sur un an par quartier de Salt Lake City. Chaque graphique circulaire est positionné sur un quartier, chaque part du cercle représente un type de crime, chaque anneau concentrique représente un mois de l'année (Source : Bell, 2010)	191
Figure 3.35. Carte et grille spatio-temporelle des déplacements d'un chevreuil selon le mois et l'heure de la journée. Chaque cercle rose, sur la carte, montre le point de départ d'un déplacement. Dans chaque grille on lit : 1) horizontalement, les 12 mois de l'année ; 2) verticalement, les heures de la journée ; 3) dans chaque case, la quantité de déplacements (Andrienko et al., 2013).....	192
Figure 3.36. Graphiques d'interactions temporelles entre plusieurs bâtiments historiques successifs situés sur la place centrale de Cracovie (Pologne). Trois scénarios alternatifs de successions des bâtiments sont proposés sur les lignes de temps A, B et C, les symboles de formes différentes représentant différents types d'événements (construction, destruction, modification). La plupart des épisodes se succèdent en temps ordonné, comme indiqué par la lettre (d). Certains épisodes sont sujets à discussion parmi les historiens et sont représentés en temps ramifié, comme indiqué par la lettre (e) (Blaise et Dudek, 2013).....	193
Figure 3.37. Géovisualisation du nombre de crimes dans la ville de Toronto en 2011, sur une échelle de temps cyclique et selon deux granularités : par heure de la journée (graphique en bas à gauche) et par jour de la semaine (en bas à droite) (Source : CrimeViz de CartoVista©)	194
Figure 3.38. L'expansion des journaux aux États-Unis entre 1690 et 2011.....	213
Figure 3.39. Evolution du taux de propriété aux États-Unis entre 1900 et 1990.....	214
Figure 3.40. Exploration de l'épidémie de SRAS de 2003 (Banos et Lacasa, 2007).....	215
Figure 3.41. Application Harmonie-Cités montrant la croissance urbaine des villes aux États-	

Unis de 1790 à 2000 (Bretagnolle et al., 2008)	216
Figure 3.42. Capture d'écran d'applications combinant cartes et graphiques, qui permettent de visualiser les paramètres mesurés en temps réel le long d'un itinéraire de course, telles que l'altitude, la vitesse de déplacement,... – A gauche : l'application mobile Garmin Connect Mobile App - A droite : le logiciel Quickroute	217
Figure 3.43. Influences spatio-temporelles entre les styles musicaux (« How music travels »)	218
Figure 3.44. Cartographie du récit de l'inondation dans la ville de la Nouvelle Orléans causée par l'ouragan Katrina (Dan Swenson, nola.com)	220
Figure 3.45. Exemples de cartes des lieux apparaissant dans des films et des relations chronologiques entre ces lieux, cartographiés avec l'application AtlasCiné (Caquard, 2011).....	221
Figure 4.1. Extrait d'instanciation de l'ontologie IDISFER sur l'exemple de l'inondation de 1940 dans les Pyrénées-Orientales. Les indications sur l'implantation spatiale et temporelle des objets utilisent le formalisme MADS (Vangenot et al., 2002; Spaccapietra et al., 2007)	232
Figure 4.2. Méthode de simplification des événements de granularités spatiales et temporelles hétérogènes	232
Figure 4.3. Correspondance entre les classes d'événements d'IDISFER et les symboles cartographiques qui leur sont appliqués.....	235
Figure 4.4. Cercle chromatique d'Itten (1961)	237
Figure 4.5. Modes contracté (à gauche) et dilaté (à droite) de la légende	239
Figure 4.6. Illustration de la méthode de la pile chronologique : les événements survenus à un même endroit au cours du temps sont ordonnés chronologiquement dans un cadre (le plus ancien de la série est placé en haut).	240
Figure 4.7. Affichage des relations de causes et conséquences d'un événement sur demande grâce au clic.	243
Figure 4.8. Affichage d'une relation de causalité entre un événement situé dans l'emprise de la carte et un événement spatialement distant, affiché dans l'encart contextuel accompagnant la carte	244
Figure 4.9. Carte à petite échelle montrant le nombre d'événements sous forme de cercles proportionnels.....	246
Figure 4.10. Interface de géovisualisation du récit d'une inondation historique	248
Figure 4.11. Déroulement d'une animation (cas d'un événement ayant une conséquence). NB : les flèches oranges surimposées à la carte indiquent les apparitions et les mouvements mais ne sont pas présentes dans l'animation finale.	250
Figure 4.12. Lignes de temps montrant les événements survenus suite à l'inondation de 1947 à Metz. (Haut) Ligne de temps régulière – (Bas) Ligne de temps proportionnelle au nombre	

d'événements.....	253
Figure 4.13. Ligne de temps dite « synthétique », proposant un résumé des événements à travers un histogramme du nombre d'événements survenus à chaque date – cas de l'inondation de 1947 à l'échelle de la ville de Metz.....	254
Figure 4.14. Résumé du protocole expérimental et des objectifs (en bleu) des différentes phases.....	259
Figure 4.15. Enoncé de la tâche complexe.....	263
Figure 4.16. Taux de bonnes réponses par dimension interrogée dans la question.....	267
Figure 4.17. Tranches d'âge des participants.....	269
Figure 4.18. Habitude ressentie d'utiliser des cartes pour trouver des itinéraires.....	270
Figure 4.19. Habitude ressentie d'utiliser des cartes pour prendre des décisions.....	270
Figure 4.20. Taux de bonnes réponses selon l'objectif des questions, tous types d'interfaces confondus.....	273
Figure 4.21. Temps de réponse moyens (en secondes) selon l'objectif des questions, tous types d'interfaces confondus.....	273
Figure 4.22. Taux de bonnes réponses selon la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte.....	276
Figure 4.23. Durée moyenne de réponse (en secondes) en fonction de la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte.....	276
Figure 4.24. Ecart moyen au nombre de clics optimal selon la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte.....	276
Figure 4.25. Durée moyenne avant le premier clic (en secondes) la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte.....	276
Figure 4.26. Effectif de questions par dimension de l'information interrogée et par complexité cognitive.....	277
Figure 4.27. Quelques exemples de traces d'utilisation avec la carte interactive (participants n°17 à 22) et avec la carte dynamique (participants n°24 à 30), visualisées avec le logiciel UT-Orange.....	278
Figure 4.28. Taux de réponses correctes selon la complexité des questions.....	280
Figure 4.29. Durée moyenne de réponse (en secondes) selon la complexité des questions.....	280
Figure 4.30. Taux de bonnes réponses selon la complexité de la question et la modalité de carte.....	281
Figure 4.31. Moyenne des durées de réponse (en secondes) selon la complexité de la question et la modalité de carte.....	281
Figure 4.32. Ecart au nombre de clics optimal selon la complexité de la question et la modalité de carte.....	281

Figure 4.33. Durée moyenne avant le premier clic (en secondes) en fonction de la complexité de la question et de la modalité de carte.....	281
Figure 4.34. Durée de réponse (en secondes) en utilisant la carte dynamique, en fonction de l'habitude ressentie d'utiliser des sources de données informatisées	284
Figure 4.35. Taux de bonnes réponses en fonction de l'ordre des questions (les taux correspondant aux questions de familiarisation sont grisés)	289
Figure 4.36. Moyenne de la durée avant le premier clic (en secondes) sur la carte dynamique, selon l'ordre des questions	290
Figure 4.37. Moyenne de la durée avant le premier clic (en secondes) sur la carte interactive, selon l'ordre des questions	290
Figure 4.38. Evolution de l'écart au nombre de clics optimal selon l'ordre des questions, avec la carte dynamique.....	291
Figure 4.39. Evolution de l'écart au nombre de clics optimal selon l'ordre des questions, avec la carte interactive.....	291
Figure 4.40. Taux de bonnes réponses selon l'ordre des questions, avec la carte dynamique	292
Figure 4.41. Taux de bonnes réponses selon l'ordre des questions, avec la carte interactive	292
Figure 4.42. Ressenti des utilisateurs sur la facilité d'utilisation, selon la modalité de carte utilisée	293
Figure 4.43. Influence de l'ordre de test sur l'évaluation de la carte dynamique.....	293
Figure 4.44. Influence de l'ordre de test sur l'évaluation de la carte interactive.....	293
Figure 4.45. Répartition des notes de l'interface de géovisualisation obtenues grâce au questionnaire SUS (noté sur 100).....	294
Figure 4.46. Pourcentage de participants préférant chaque modalité de carte, en fonction de l'ordre de test de cette modalité.....	295
Figure 4.47. Classement des modules de l'interface jugés les plus utilisés (note calculée en fonction de leur position de classement par chaque participant).....	297
Figure 4.48. Mise en carte de la proposition d'un participant d'associer la couleur à la localisation spatiale plutôt qu'à la date.....	306
Figure 4.49. Exemple d'affichage dans la carte de l'ensemble de la chaîne de causalité partant et arrivant d'un événement.....	308
Figure 4.50. Exemple d'un graphique en réseau montrant les relations entre événements du récit, qui pourrait être associé à la carte.....	309
Figure 4.51. Modèle de protocole expérimental adapté au test d'une interface de géovisualisation (remplir les zones grises avec le numéro du groupe).....	319

Figure A.1. Méthode de recherche et de capitalisation de documents d'archives.....	336
Figure A.2. Détail de la partie de l'ontologie du système ferroviaire, relative à la maintenance et au système humain	340
Figure A.3. Détail de la partie de l'ontologie du système ferroviaire relative à l'exploitation	341
Figure A.4. Détail de la partie de l'ontologie du système ferroviaire, relative à l'infrastructure	342
Figure A.5. Interrelations entre les facteurs d'incertitude de l'Information Dédiée aux Événements (Arnaud, 2009).....	346
Figure A.6. Taxonomie de l'information imparfaite (Snoussi et al., 2012). Les termes écrits en vert sont ceux ajoutés par rapport à la classification de (Smets, 1997).	347
Figure A.7. Classification montrant les niveau (ou couches) d'incertitude (Skeels et al., 2008)	348
Figure A.8. Typologie de l'information imparfaite	350

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Besoins d’informations et d’analyses sur les inondations historiques majeures dans divers cas d’usage (les items en gras ont été jugés comme étant les plus importants par les experts métier associés au projet).....	42
Tableau 1.2 : Données qu’il serait utile d’intégrer dans une carte des inondations historiques majeures (les items en gras ont été jugés comme étant les plus importants par les experts métiers associés au projet).....	42
Tableau 1.3. Contenu des cartes de risques requis pour trois profils d’utilisateurs : les experts techniques, les gestionnaires de crise et le grand public (Meyer et al., 2012).....	82
Tableau 1.4. Recommandations pour la visualisation des données dans les cartes de risques, à destination de différents publics (Meyer et al., 2012)	83
Tableau 3.1. Propriétés visuelles pré-attentives qui peuvent être traitées automatiquement (Healey et al., 1995)	145
Tableau 3.2. Comment la visualisation d’informations amplifie la cognition (traduit de l’anglais d’après (Card et al., 1999))	156
Tableau 3.3. Forces et faiblesses des plan d’expérience « within-subject » et « between-group » (d’après (Hall, 1998; Wikipedia, 2015)).....	159
Tableau 3.4. Requêtes portant sur les processus spatio-temporels et modes de visualisation suggérés (d’après Cheylan, 2007).....	196
Tableau 3.5. Les modes de représentations cartographiques des temporalités préconisés par la littérature.....	198
Tableau 4.1. Liste des questions posées lors du test et dimensions de l’information interrogées	261
Tableau 4.2. Taxonomie de la complexité cognitive des questions (traduit de l’anglais à partir de Anderson et Krathwohl, 2001; cités par Wu et al., 2012)	268
Tableau 4.3. Complexité cognitive des questions dans notre expérimentation (les questions imprécises ont été exclues des analyses)	268
Tableau 4.4. Exemples de réponses de participants illustrant les différences dans le niveau de détail traité	299
Tableau 4.5. Ordre de passation des deux séries de tâches élémentaires (remplir les zones grises avec le nom des modalités).....	320
Tableau A.2. Les dix facteurs d’incertitude utilisés dans les sciences (Arnaud, 2009).....	345

Remerciements

Je souhaite exprimer ma grande reconnaissance aux membres de mon jury qui ont accepté d'évaluer les travaux produits durant ces trois années de thèse. Merci tout d'abord à Freddy Vinet, Président du jury, pour son intérêt et pour avoir accepté de prendre en charge la présidence du jury. Merci à Sara Fabrikant et Thierry Joliveau, rapporteurs du mémoire, pour leur lecture attentive, leur disponibilité et leurs remarques et questions très pertinentes et intéressantes. Merci également à Jean-Yves Blaise pour m'avoir apporté beaucoup d'inspiration de recherche issues de sa discipline, grâce à nos collaborations passées, et pour avoir accepté de discuter mon travail le jour de la soutenance. Enfin, merci à Florence Margiocchi pour ses encouragements tout au long de ma thèse et pour sa disponibilité et son point de vue éclairant en tant qu'invitée dans mon jury.

Cette thèse n'aurait pas atteint ce niveau de qualité sans l'accompagnement toujours attentif de mes directrices de thèses et de mes encadrantes côté entreprise. Je souhaite remercier chaleureusement Paule-Annick Davoine et Marlène Villanova-Oliver, du Laboratoire d'Informatique de Grenoble, de m'avoir fait confiance pour mon premier emploi au laboratoire et de m'avoir ensuite encouragée à poursuivre en thèse. Cette aventure a été belle grâce à vous, à votre grande attention tout au long de ces trois années (je devrais même dire cinq années, en incluant mes années en tant qu'ingénieur d'étude !) et votre patience lors de la phase finale des corrections du manuscrit. Merci aussi à mes non-moins amicales encadrantes industrielles, Cicely Pams Capoccioni et Dorine Chenier. Vos conseils judicieux et votre accompagnement m'ont fait évoluer positivement, professionnellement comme humainement, et m'ont permis de toujours garder le cap quoi qu'il arrive.

Je souhaite également remercier Denis Cœur, sans qui cette thèse n'aurait pas vu le jour, qui a participé activement au montage du projet de collaboration puis m'a appuyé dans mes recherches sur tous les aspects historiques et de collecte documentaire. Un grand merci aussi à Anne Redon qui a apporté son expertise archivistique, son sérieux et sa bonne humeur sur tout le volet de la collecte, de l'inventaire et du traitement des données d'entrée utiles à ma thèse. Sans votre appui à tous deux, aucune des propositions formulées dans ce manuscrit n'auraient pu voir le jour !

Cette aventure qu'est la thèse a été belle aussi grâce à mes collègues, côté Laboratoire tout d'abord, qui sont trop nombreux pour que je les cite tous et je vous prie de m'en excuser. Merci à tous les permanents, ingénieurs et doctorants de l'équipe Steamer pour leur enthousiasme au quotidien et leurs repas partagés ! Merci à mes confrères et amis de l'association Synergy pour le soutien mutuel et les activités d'animation qui ont ponctué la vie du Labo. Merci aussi à Roland Groz, Nadine Mandran, Raffaella Balzarini et Christophe Bobineau pour leur gentillesse et leur prise de nouvelles régulière.

Côté SNCF I&P, je remercie les collègues de LVE, plus particulièrement de la division CIR mais aussi d'EGP, OTH, ENV et ATT avec qui j'ai pu collaborer, partager des repas plus festifs et travailler dans la bienveillance et la convivialité !

En dernier lieu, je tiens à remercier Roman, mon cher et tendre, qui m'a suivie et soutenue dans les hauts et les bas de ces trois dernières années. Merci beaucoup pour m'avoir supportée, aussi, dans les moments moins faciles. Je remercie également mes parents pour leur intérêt dans mon sujet, pour m'avoir hébergé de nombreuses fois lors de mes multiples déplacements professionnels et pour avoir relayé les nouvelles de ma thèse auprès de toute la famille.

A tous et à tous ceux que je n'ai pas cité de vive voix mais qui m'ont, eux aussi, suivie et accompagnée durant ces années de Recherche : mille mercis !

Introduction générale

Introduction générale

Contexte

Les événements historiques issus de risques sont une source d'information importante pour la compréhension et la prévention des risques naturels (Coeur et Lang, 2008). Par *événements issus de risque*, on entend à la fois l'aléa naturel qui concrétise le risque sur un territoire (on parle par exemple d'« événement d'inondation » pour désigner une inondation particulière) et on désigne également les conséquences issues de cet événement source, notamment ses impacts sur le territoire.

L'information historique sur les événements est riche d'enseignements, que ce soit pour comprendre et modéliser les phénomènes naturels, pour évaluer la vulnérabilité des territoires ou pour mettre en place des plans de prévention des risques. *L'information historique* est un ensemble de données interprétables, relatives à des événements ou des périodes qui sont survenus dans le passé et qui sont révolus. Cette définition insiste sur la distinction entre les données collectées sur un événement en cours (par exemple la localisation des lieux sinistrés lors d'une catastrophe naturelle, qui permet d'envoyer les secours sur place) de celles sur les événements terminés. Cette différence a une implication sur les usages qui seront fait de ces deux types d'informations : les informations pendant un événement, utilisées pour y réagir, et les informations historiques utilisées a posteriori, dans des contextes et avec des objectifs différents.

Les événements issus de risques sont souvent étudiés par les experts du risque dans leurs dimensions spatiales (lieu de survenue, topographie du terrain...) et temporelles (durée de l'événement, vitesse de propagation, fréquence d'apparition du phénomène...). A ce titre, la cartographie et les systèmes d'information géographique (SIG) se sont imposés comme des outils incontournables pour étudier les risques naturels (Goodchild, 2006). La carte géographique est un objet complexe dans sa nature, son rôle et son usage. La science cartographique a pour objectif de créer des méthodes pour garantir que l'objet « carte » assure correctement son rôle d'outil auprès des utilisateurs.

Dans la culture occidentale, la *carte géographique* peut être définie comme une représentation graphique et simplifiée, plane ou tridimensionnelle, d'objets réels ou fictifs organisés dans l'espace (Palsky, 2014). La carte sert de support à *l'information géographique*, c'est-à-dire une information extraite de données modélisant un objet ou un phénomène localisé à la surface de la Terre (P.-A. Davoine, 2014).

La carte est avant tout un outil. Elle permet de repérer, communiquer et transmettre l'information (Cauvin et al., 2007). Elle peut également soutenir l'analyse, la construction de connaissances et la prise de décision (M.-J. Kraak et Ormeling, 2011). Enfin, en tant qu'image visuelle, la carte a également une dimension esthétique et artistique (Keates, 1996, p. 221), qui ne doit pas être négligée sous peine de détériorer sa lecture (Jégou, 2013).

Alors qu'elles étaient traditionnellement imprimées sur papier, le développement de l'informatique a provoqué l'avènement de nouvelles formes de carte à partir des années 1970. La carte est alors devenue interactive, animée, 3D, enrichie de contenu multimédia et intégrée au sein d'un environnement de *géovisualisation*. Lorsque la carte est à la fois interactive *et* animée, on emploie le terme de « *carte dynamique* ».

De nos jours, les cartes n'ont jamais été aussi faciles à créer ni aussi diffusées. Mais cette démocratisation des cartes ne va pas de pair avec une augmentation de leur efficacité à communiquer l'information. En effet, les règles de conception de cartes établies par la science cartographique doivent être adaptées à ces nouveaux formats de diffusion. Et les fonctionnalités ajoutées à la carte informatique peuvent augmenter mais également complexifier la lecture de l'information géographique pour les utilisateurs.

Problématique

Les cartes dynamiques offrent de nouveaux potentiels pour construire de la connaissance sur les événements historiques issus de risques naturels. La représentation cartographique de ces événements soulève cependant un certain nombre de verrous méthodologiques.

Tout d'abord, l'information historique présente des caractéristiques particulières qui complexifient sa visualisation dans la carte :

- Les événements issus de risques possèdent non seulement une dimension spatiale mais aussi une dimension temporelle. Si la carte est un format préférentiel pour représenter l'espace, il est plus délicat d'y faire figurer le temps. Un certain nombre de méthodes cartographiques existent mais sont-elles adaptées à la compréhension de phénomènes dynamiques tels que ceux impliqués dans les processus de risques ?
- Une notion importante associée aux événements issus de risques est l'*effet domino*, terme issu du domaine des risques industriels (Heinrich, 1931). Ce concept désigne le fait qu'un aléa initial entraîne par effet en chaîne d'autres événements, ce qui conduit d'une situation initiale de faible impact à un événement d'ampleur catastrophique. Une carte décrivant les événements historiques issus de risques devrait permettre de visualiser les effets dominos pour appréhender la complexité des catastrophes passées. Mais comment faire figurer sur la carte ces événements en chaîne, parfois complexes, sans compromettre sa lisibilité ?

Par ailleurs, pour transmettre son message et encore plus pour pouvoir conduire des analyses, la carte doit être adaptée au lecteur. Elle doit répondre à ses objectifs de lecture et donner à voir les informations pertinentes pour ses usages. Elle doit aussi être assez lisible pour lui permettre de percevoir l'information sans effort superflu.

Les capacités cognitives de l'être humain (perception, mémorisation,...) sont par nature limitées. Le but des outils de visualisation d'information est de fournir une aide extérieure pour augmenter ces capacités (Norman, 1993, p. 43). La prise en compte des besoins de l'utilisateur final de la carte guide la forme de la production cartographique et, même avant

cela, intervient dès la phase de sélection et de structuration des données. Comment adapter la représentation cartographique aux besoins et aux capacités de l'utilisateur ? Quelles caractéristiques vont influencer sa lecture et sa compréhension des phénomènes représentés ?

Notre problématique est donc de savoir quelles représentations cartographiques sont les plus adaptées pour valoriser l'information sur les événements historiques issus de risques naturels, en tenant compte du profil des utilisateurs de la carte et de leurs besoins.

Partenariat industriel

Cette thèse de doctorat s'est inscrite dans un dispositif CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) qui associe le département I&P - LVE de l'entreprise SNCF Réseau (Ingénierie et Projet, département Lignes, Voies et Environnement) et l'équipe STeamer (Spatio-Temporal information, Adaptability, Multimedia and Knowledge Representation) du Laboratoire d'Informatique de Grenoble. Il est intégré au projet DHI-Avenir de SNCF Réseau (Données Historiques sur les Inondations : Anticiper et Valoriser les Événements Naturels ayant eu un Impact sur le Réseau).

Initié en 2013, ce projet a pour but d'identifier les méthodes adaptées à la valorisation des informations historiques pour les utiliser dans la prévention et la protection du système ferroviaire face aux risques naturels. La thèse devait donc également répondre à une double problématique industrielle : 1) identifier les intérêts et les enjeux de prendre en compte l'information historique sur le risque inondation dans la production ferroviaire et 2) identifier et développer une méthode adaptée à la valorisation de ces données.

Hypothèses et plan du mémoire

Notre hypothèse est qu'une visualisation cartographique constituerait un format adapté à la valorisation des informations sur les inondations historiques et que ce format serait susceptible de répondre aux besoins des experts. Une « visualisation cartographique » désigne ici une carte informatique, dotée de fonctions interactive, qui étendent les possibilités de représentations et d'interrogation des données par rapport aux cartes statiques traditionnelles.

La **première partie** de ce mémoire permet de confronter cette hypothèse au contexte du système ferroviaire et aux besoins des utilisateurs face aux inondations. Le **chapitre I** présente le cadre applicatif dans lequel s'est déroulée la thèse, en explicitant la façon dont il a orienté la recherche. Le **chapitre II** confronte les besoins des utilisateurs aux usages des cartes géographiques dans le domaine des risques naturels, afin d'identifier les intérêts et les limites des travaux existants dans notre cadre d'application.

Cette première partie met notamment en évidence que la connaissance du récit des événements historiques issus de risques et de leur déroulement spatio-temporel enrichirait l'analyse des experts. Or, la dimension narrative associée aux processus de risques a été peu traitée par la recherche en géovisualisation. La thèse s'attache donc à proposer des méthodes sémiologiques et de géovisualisation pour représenter les récits d'événements historiques issus de risques.

Cela amène à poser deux nouvelles hypothèses de travail : premièrement, qu'une interface cartographique peut représenter efficacement des récits d'événements et les effets dominos les reliant et, deuxièmement, que ce type d'interface est utilisable par notre public d'experts thématiques. Ces deux hypothèses ont été vérifiées au cours du travail de thèse.

Pour garantir l'utilité et l'utilisabilité de la représentation cartographique finale, nous avons adopté une démarche méthodologique « orientée utilisateurs » : les utilisateurs, la connaissance de leur profil et de leurs besoins ont été mobilisés à chaque étape de la chaîne de traitement de l'information géographique, de la sélection et la formalisation des données d'entrée jusqu'à l'usage de la carte. La connaissance des mécanismes cognitifs intervenant dans la lecture et la compréhension des cartes peut également influencer les choix de représentations graphiques. Le plan de la suite du mémoire suit l'ordre de cette démarche méthodologique (Figure 0.1).

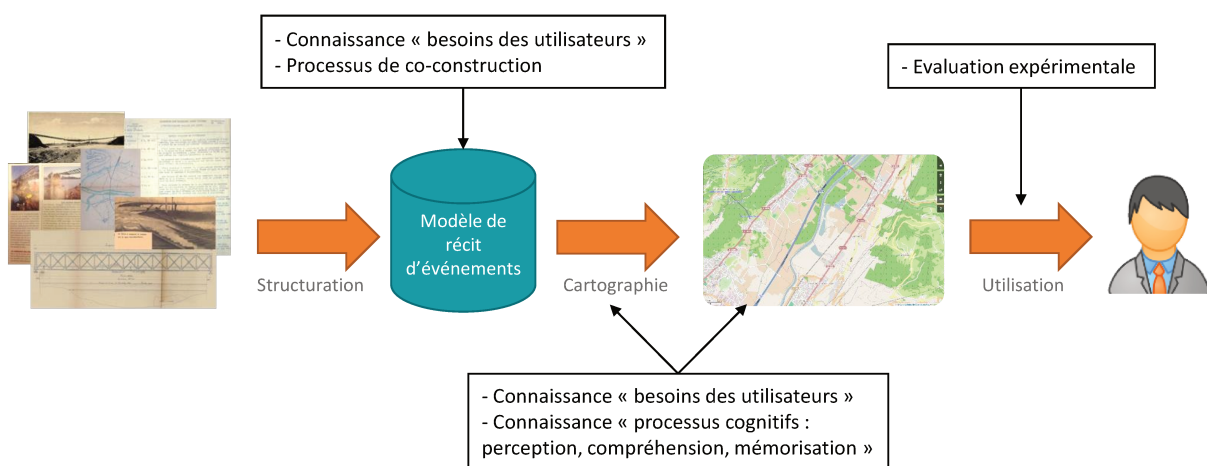


Figure 0.1. Démarche méthodologique suivie dans le travail de thèse, intégrant les utilisateurs depuis la modélisation des données jusqu'à l'usage de la carte

La première étape vers la construction d'une carte adaptée aux besoins est la structuration des données au sein d'un modèle, qui correspond aux informations habituellement utilisées par les utilisateurs. En effet, les choix de conceptualisation auront un impact sur les représentations cartographiques qui pourront être appliquées, en termes de contenu comme de sémiologie. La formalisation des données est présentée dans la **deuxième partie**.

Les données de récit ont été formalisées sous la forme d'une ontologie, un format lisible

informatiquement, aisément adaptable et partageable entre divers acteurs ou systèmes logiciels. Le **chapitre III** présente la démarche de construction de cette ontologie, élaborée avec les utilisateurs finaux et alimentée par un état de l'art dans le domaine des événements et des impacts de risques naturels.

La **troisième partie** s'intéresse aux modalités de visualisation disponibles dans la littérature, pour cartographier les récits. Le **chapitre IV** expose les apports des sciences cognitives pour concevoir des cartes adaptées aux processus de lecture et de compréhension mis en œuvre lors de la lecture d'une carte, et les méthodes expérimentales qu'elles proposent pour évaluer les cartes dans leurs contextes d'usage.

Le **chapitre V** présente les méthodes de représentation du temps et des récits dans les cartes et les géovisualisations. Il discute les différentes formalisations du paramètre temps et présente les résultats d'études s'étant attachées à évaluer l'efficacité des représentations cartographiques de temporalités et de dynamiques auprès des utilisateurs.

De l'analyse de ces états de l'art, nous proposons une méthode de visualisation cartographiques de récits d'événements, tels que formalisés dans l'ontologie, à destination de notre public d'experts. Ces propositions sont présentées dans la **quatrième partie**.

Il est possible d'établir des règles génériques de correspondances, qui associent chaque instance de classe de l'ontologie à une représentation cartographique. Ces règles, présentées dans le **chapitre VI**, prennent en compte les caractéristiques des données d'entrée, le fonctionnement du système perceptif humain et les besoins des utilisateurs pour fournir une représentation adaptée aux usages identifiés de la carte.

Les propositions cartographiques ont été évaluées expérimentalement au cours d'un test utilisateur présenté dans le **chapitre VII**. L'analyse critique des résultats permet d'émettre des recommandations pour la conception de protocoles expérimentaux adaptés aux tests d'interfaces de géovisualisations, recommandations qui sont présentées dans le **chapitre VIII**.

Partie 1

Contexte et problématique

Partie 1 : Contexte et problématique

Ce travail de thèse se situe dans un cadre appliqué, en partenariat étroit avec la SNCF. L'objectif initial était de mettre en place une méthode de valorisation de l'information historique sur les inondations majeures, sous forme cartographique, pour faciliter son exploitation au quotidien par les experts du réseau ferré. Ce cadre d'application a guidé la recherche tout au long de son déroulement et a cristallisé un certain nombre de problématiques scientifiques dans son sillage.

Cette première partie vise à présenter ce cadre applicatif, notamment les lignes directrices et les contraintes qu'il impose dans le travail de recherche. Elle s'organise en deux volets.

Le chapitre I présente le contexte du système ferroviaire et les enjeux auxquels il est confronté face aux risques naturels, et face aux inondations en particulier. Le propriétaire et gestionnaire d'infrastructure ferroviaire (SNCF Réseau), partenaire du projet, a des besoins spécifiques en regard des inondations, qu'il convient de prendre en considération pour construire une méthode de valorisation des données historiques qui réponde à ses objectifs. La connaissance de ses besoins permet de justifier l'intérêt de l'outil cartographique pour visualiser les inondations dans le contexte ferroviaire. Elle conduit à émettre l'hypothèse qu'une carte interactive ou dynamique peut contribuer à valoriser l'information historique sur les risques dans le contexte de la gestion du système ferroviaire.

La carte géographique est un outil de capitalisation incontournable dans l'étude des risques naturels (Goodchild, 2006). Elle permet de localiser les risques, passés ou projetés, dans le territoire, d'analyser la distribution et les motifs spatiaux dessinés par les phénomènes et constitue un outil d'aide à la décision (M.-J. Kraak et Ormeling, 2011). Pour être efficace, une carte doit suivre un certain nombre de règles de conception et tenir compte des caractéristiques et des besoins du public auquel elle s'adresse. Le chapitre II expose le contexte de la cartographie et les principes généraux de conception de cartes, qui visent à garantir leur utilité et leur utilisabilité. Il expose ensuite comment les cartes sont appliquées dans le domaine d'étude des risques naturels et comment les règles de représentations sont étendues selon les publics et les usages des cartes. L'étude des formes cartographiques nous permet d'orienter et de cadrer la recherche et les propositions émises dans le cadre de ce mémoire.

I/ Contexte et enjeux du système ferroviaire

Les inondations historiques et leurs impacts sur le système ferroviaire sont au cœur de cette thèse. Nous présentons dans un premier temps ce qu'est le système ferroviaire, afin d'explicitier le contexte dans lequel s'insère le travail présenté dans ce manuscrit.

1. Organisation du système ferroviaire en France

Le travail de thèse a été conduit en partenariat avec le département « Lignes, Voies, Environnement » de la direction Ingénierie & Projets de SNCF Réseau. SNCF Réseau est le propriétaire et gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire française. L'entreprise se positionne comme une des branches du *système ferroviaire*.

Le terme « système ferroviaire » désigne l'ensemble des objets, des infrastructures, des acteurs et des activités, mobilisés pour faire circuler les trains. Tous ces composants sont en interaction.

Au sein de ce système, SNCF Réseau est chargé de la gestion et de l'entretien de l'infrastructure ferroviaire, constituée de multiples composants (voie, ouvrages d'art, ouvrages en terre, signalisation, réseau de télécommunication, etc.) et de la gestion des plannings de circulation des trains. Mais l'une de ces activités peut être impactée par celle d'un autre acteur du système. SNCF Réseau exerce ses activités en interaction avec vingt-quatre opérateurs ferroviaires, faisant circuler des trains sur son réseau, avec les fournisseurs d'énergie, les opérateurs de télécommunication, etc.

A titre d'illustration des interactions entre composants du système ferroviaire, un train en panne conduira, d'une part, à modifier la signalisation pour ralentir ou stopper les trains qui lui succèdent sur la ligne et, d'autre part, à recalculer le planning de circulation. Par propagation sur le réseau, ces effets pourront s'étendre à d'autres lignes ferroviaires initialement non concernées. La coordination des réactions pour remettre en état le système passe par de nombreux flux d'information, qui peuvent être informatiques, par exemple entre les systèmes de régulation automatisés des circulations, et humains, entre de nombreux acteurs de profils métiers variés, localisés dans différents établissements ferroviaires dans toute la France. Si un deuxième incident survient et s'ajoute au premier, la gestion des événements s'en trouvera d'autant plus complexifiée.

A travers cet exemple, on peut percevoir que le système ferroviaire est un *système complexe*.

Un système complexe, dans les Sciences, est un ensemble constitué d'un grand nombre

d'entités en interaction qui empêchent l'observateur de prévoir sa rétroaction¹, son comportement ou son évolution par le calcul (Wikipedia, 2016f).

Pour étudier les impacts des inondations sur ce système, il est donc nécessaire de :

- comprendre son fonctionnement global, les composants de l'infrastructure et des circulations, leurs interactions entre eux et avec le système humain,
- identifier les parties du système qui sont vulnérables aux inondations, et
- cibler le contexte d'usage précis, parmi les 150 métiers de SNCF Réseau, dans lequel sera utilisée l'information sur les inondations.

Qui dit multiplicité des points d'impact des inondations sur le système ferroviaire dit multiplicité des acteurs de l'entreprise potentiellement concernés par cette thématique. Or un outil de valorisation de l'information historique peut difficilement répondre aux enjeux et besoins de tous les acteurs sans devenir trop complexe à utiliser. Il est nécessaire qu'il s'adresse à un public défini afin de maximiser son utilité et son utilisabilité. Par « utile » nous désignons un outil qui intègre un contenu et des fonctionnalités permettant de remplir un ou plusieurs objectifs métiers des utilisateurs, tandis que par « utilisable » nous entendons un outil dont le fonctionnement est assez aisé pour permettre de l'utiliser.

La thèse se déroulant à SNCF Réseau, notre étude du système ferroviaire s'est concentrée dans un premier temps sur les impacts des inondations sur les domaines d'expertise propres à cette entité, à savoir l'infrastructure ferroviaire, la maintenance et la gestion des circulations ferroviaires.

Le dessin d'un portrait global du système ferroviaire et de ses enjeux face au risque inondation a été possible grâce à des réunions de travail collaboratif et des entretiens, afin de mobiliser les connaissances de divers métiers ferroviaires. Les résultats permettent de mesurer les enjeux de la problématique inondation pour le gestionnaire d'infrastructure et sont présentés dans la section suivante.

2. Le système ferroviaire face aux inondations historiques

2.1. Une histoire marquée par les inondations majeures

Les inondations ont marqué l'Histoire du chemin de fer depuis ses origines. Les archives historiques de la SNCF regorgent de documents rédigés suite à des inondations, remontant pour certains aux années 1860, époque de la construction des premières lignes ferroviaires. Parmi cet historique, les inondations dites « majeures » (parfois appelées inondations « extrêmes » ou encore « remarquables ») sont les plus destructrices. Les inondations majeures se distinguent par une faible fréquence (probabilité d'occurrence de 1 sur 100

¹ Rétroaction : régulation positive ou négative d'une cause par son propre effet

chaque année ou moins) et une très grande gravité : de nombreuses victimes, des dommages importants aux biens et à l'environnement (PRIM, 2009a). Les impacts des inondations majeures sur le système ferroviaire recouvrent les dommages à l'infrastructure, le coût lié à la non-exploitation de gares et du réseau, à l'interruption des circulations commerciales, mais aussi les répercussions sociales et économiques dans les zones qui ne sont plus desservies : gêne pour les mobilités pendulaires, arrêt du tourisme, absence de livraisons de matières premières et de produits finis, etc.

L'exemple des inondations dans le département de l'Aude de 1999 est très représentatif. Du 12 au 13 novembre 1999, un épisode de pluies diluviennes frappe la région Languedoc-Roussillon et l'extrémité orientale de la région Midi-Pyrénées. Il touche principalement quatre départements : les Pyrénées-Orientales, le Tarn, l'Hérault et surtout l'Aude, où ses conséquences ont pris les proportions d'une catastrophe. Les fortes précipitations se combinent à une tempête de vent qui souffle à 100 km/h pendant 24h, dès la fin de matinée du 12 novembre. Cette tempête provoque des surcotes du niveau de la mer de plus de 1 mètre, ce qui ralentit l'écoulement naturel des rivières vers leur embouchure. La majorité des dommages sont survenus dans la nuit du 12 au 13 novembre, mais l'eau s'attardera dans les basses plaines de l'Aude jusqu'au 15 novembre. A l'échelle de la région Languedoc-Roussillon, six lignes ferroviaires sont sévèrement endommagées. Uniquement sur la ligne de Bordeaux à Sète, qui longe l'Aude sur une partie de son linéaire, on dénombre plus d'une centaine d'incidents en 53 points du réseau, pour une longueur impactée cumulée de 10,4 km, soit autant de portions de voies à réparer ou, parfois, à reconstruire totalement (Figure 1.1). Les circulations ont été rétablies au bout de 14 jours, sans aucune circulation possible durant toute cette période, ce qui représente une gêne importante, sur cet axe clé qui relie l'Atlantique à la Méditerranée. Etudier les inondations majeures permettrait de mieux connaître leurs effets spécifiques.



Figure 1.1. Photos de dommages aux ouvrages ferroviaires sur la ligne de Bordeaux à Sète, dus à l'inondation de 1999 dans l'Aude (Crédits photos : SNCF Réseau)

2.2. Les risques majeurs : des phénomènes méconnus mais pas rares

Malgré leur fort impact, les événements de risques majeurs tendent à disparaître de la

mémoire collective, notamment en raison de leur faible fréquence (Weiss et Richard, 2013). Ils sont également mal connus par la science car l'étude de ces phénomènes s'appuie sur des séries temporelles à relativement court terme. Par exemple, les données collectées sur les inondations depuis la mise en place de dispositifs de mesures sur les rivières (qui se sont développés à partir des années 1970), ne sont pas suffisantes d'un point de vue statistique pour estimer de façon fiable l'impact de ces inondations de très faible occurrence (Naulet, 2002). Les données d'archives, résultant de témoignages d'observateurs, de rapports ou d'ouvrages anciens, restent peu utilisées. Cela s'explique par le fait que les documents d'archives sont souvent peu accessibles (inventaires partiels, données non structurées et hétérogènes) et qu'ils peuvent contenir des incertitudes ou des imprécisions. Dans le domaine de l'hydrologie, où une grande précision est requise dans les calculs de précipitations ou de débit, l'information historique est souvent considérée comme douteuse (Bernier et al., 1986).

Les risques majeurs sont donc mal connus mais ils n'en demeurent pas moins un risque concret. A titre d'exemple, à l'échelle d'une région comme le Languedoc-Roussillon, on recense environ un événement hydro-météorologique majeur tous les 10 ans, survenant en différents endroits du territoire (calculé à partir de (Météo France, 2014)). Etant donné que les inondations majeures ont une probabilité d'occurrence (ou « période de retour ») centennale ou supérieure (on inclue ici les niveaux d'aléa qualifiés de « moyen » à « extrême » sur les cartes de TRI²), le retour d'expérience ne devrait théoriquement indiquer qu'une inondation majeure tous les 100 ans. La haute fréquence observée s'explique par le fait que la probabilité s'applique à l'échelle de chaque bassin versant de cours d'eau indépendamment des autres.

Avec le changement climatique et l'augmentation des surfaces urbanisées, les modèles actuels prévoient une augmentation de la fréquence des inondations extrêmes dans le futur (Agence Européenne de l'Environnement, 2013).

Le travail présenté dans ce manuscrit s'est donc appuyé sur le cas d'étude des *inondations majeures*, qui sont un enjeu pour la conception et la maintenance des installations ferroviaires.

2.3. Les enjeux de recourir à l'information historique sur les inondations dans le domaine ferroviaire

Pour le gestionnaire d'infrastructure ferroviaire, les enjeux face aux inondations sont multiples. Le premier, en termes d'importance, est de garantir la sécurité et la qualité du réseau ferré pour ses clients, les opérateurs ferroviaires. Les retours d'expériences réalisés à la suite d'inondation participent aujourd'hui à l'établissement de règles de

² Source : <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion/inondations/cartes.php>, consulté le 05/01/2017

dimensionnement, des petits ouvrages hydrauliques jusqu'aux grands viaducs (Chazelle et al., 2012).

Lors d'un événement majeur, la répartition des écoulements superficiels et internes peut être différente des épisodes courants. Pour les lignes ferroviaires les plus anciennes, la connaissance des événements majeurs n'était pas systématiquement intégrée dans la conception. Leur prise en compte peut amener à modifier le dimensionnement des ouvrages de décharge pour assurer la sécurité du système.

La garantie de sécurité n'est pas seulement d'ordre technique mais aussi organisationnel. Le gestionnaire d'infrastructure doit installer des dispositifs de détection aux points du réseau identifiés comme étant vulnérables, et instaurer des protocoles de réaction lors de la survenue d'un événement menaçant, par exemple l'arrêt de l'ensemble des circulations pour vérifier la sécurité des voies.

Le deuxième enjeu du gestionnaire d'infrastructure est de limiter les coûts liés aux événements d'inondation. Il s'agit, d'une part, du coût des travaux de réparation sur les segments endommagés et, à moyen-terme, des coûts de maintenance si les installations ont été fragilisées. D'autre part, un coût est lié à l'interruption des circulations commerciales pendant la période de remise en état du réseau.

Lors de la survenue d'une inondation, le gestionnaire d'infrastructure doit donc réorganiser le plan de transports pour maintenir les circulations et optimiser la réalisation des travaux pour rendre la voie à la circulation le plus rapidement possible. Le retour d'expérience peut donner des informations sur les points du réseau sensibles aux inondations et sur les procédures de gestion de crise mises en place dans le passé : lieux de garage du matériel roulant, itinéraires de substitution, solutions de transports alternatives pour les voyageurs, etc., afin de préparer les crises futures.

L'information historique présente donc un intérêt réel pour la prévention et la gestion des inondations. Les deux principaux enjeux face au risque inondation sont d'assurer la sécurité des circulations et de limiter les coûts financiers des dommages.

Ces enjeux sont implicitement intégrés dans le travail quotidien des agents ferroviaires. La méthode de valorisation des inondations historiques que nous souhaitons développer ici a donc pour première mission de répondre à ces enjeux.

La connaissance de ces enjeux peut nous permettre de dresser une première liste de données historiques sur les inondations qu'il serait intéressant de valoriser auprès des experts du ferroviaire. Cependant, pour construire une méthode de valorisation adaptée dans la pratique, il convient d'identifier des exemples concrets de situations dans lesquelles sont employées les informations historiques.

L'identification des besoins des experts peut permettre de définir les données à valoriser et le format qui serait adapté pour permettre aux utilisateurs d'atteindre leurs objectifs.

Comme mentionné en introduction, nous anticipons que le format cartographique pourrait être adapté, ayant aujourd'hui prouvé son intérêt dans l'étude des risques naturels. Néanmoins, il convient de vérifier si ce format est réellement adapté aux besoins des experts. Une analyse des pratiques métiers et des besoins des experts du système ferroviaire a donc été conduite, pour maximiser l'utilité et l'utilisabilité d'un outil cartographique de valorisation des inondations.

3. Besoins du gestionnaire d'infrastructure ferroviaire

Quelles données sont utiles à l'analyse des inondations majeures ? Dans quels contextes l'information historique sur les inondations est-elle mobilisée par les experts du ferroviaire ? Quelles sont les habitudes d'usage d'informations spatiales, de cartes papier ou informatisées et de données historiques par ces experts ? Autant de questions permettant de mieux cerner les besoins et les pratiques des utilisateurs de données historiques. En effet, pour que notre méthode de valorisation de données historiques soit effectivement utile, elle doit répondre aux besoins des utilisateurs et, pour être effectivement utilisée, il faut qu'elle s'inscrive dans le prolongement des pratiques existantes sans imposer de rupture trop brutale des pratiques.

Les réponses à ces questions ont été identifiées au moyen d'entretiens individuels, d'observation et d'une réunion d'intelligence collective, dont les méthodologies sont présentées ci-après. Les résultats sont ensuite présentés, nous donnant des indices sur les contextes d'usage des inondations historiques, les besoins en informations et en analyses des utilisateurs et enfin les usages actuels des utilisateurs dans lesquels intégrer notre méthode de valorisation d'information.

3.1. Méthodes d'identification des pratiques et des besoins des utilisateurs

La demande d'un outil de géovisualisation pour étudier les inondations résulte d'une approche « top-down », c'est-à-dire qu'elle provient initialement d'un petit nombre d'acteurs souhaitant populariser l'utilisation de données historiques grâce aux outils numériques, pour faciliter le travail quotidien des agents. Les outils de géovisualisation ne sont pas encore utilisés au sein des services, même si l'usage de cartes géographiques est largement répandu. L'un des enjeux du travail était donc de s'assurer qu'il existait un réel besoin d'étude des inondations historiques et, si oui, en quoi l'outil que nous proposerions pouvait être utile. L'identification du profil et des besoins des utilisateurs a été réalisée grâce à trois méthodes : l'observation directe, des entretiens individuels et une réunion d'intelligence collective.

3.1.1. Observation directe des pratiques et identification des besoins

La première méthode pour connaître les besoins relatifs à la connaissance des inondations historiques majeures a été l'observation directe. Cette méthode consiste à s'immerger dans un groupe et à observer les pratiques de ses membres, à la manière d'un journaliste construisant un reportage (Arborio et Fournier, 1999). D'un point de vue méthodologique, nous avons opté pour une observation à découvert et participante. Une observation « à découvert » désigne le fait que l'observateur déclare son rôle auprès des agents observés (les sujets savent qu'ils sont observés) et « participante » signifie que l'observateur participe au travail qu'il observe, ne reste pas extérieur à la situation, ce qui présente l'avantage de mieux comprendre les pratiques professionnelles mais a aussi l'inconvénient d'entraver en partie l'observation du fait que l'agent observateur a des tâches à réaliser en parallèle de celle-ci (*ibid*). L'observation systématique a été appliquée sur une période de huit mois, correspondant au début de l'immersion dans l'entreprise. Le terrain d'étude était constitué du département « Lignes, Voies et Environnement » de la Direction de l'Ingénierie SNCF. Les observations ont concerné un ensemble non-exhaustif de situations parmi les pratiques professionnelles existantes dans l'entreprise : rencontres et entretiens avec des collègues, réunions de travail participantes, réunions en tant que simple observateur et moments de discussions informelles.

Ce mode d'observation vise généralement à collecter des pratiques sociales, gestuelles ou verbales (Arborio et Fournier, 1999). Ce travail a permis de dresser un tableau : 1) des pratiques métiers dans le département et en particulier des contextes d'étude des inondations, 2) des besoins en informations relatives aux inondations historiques et 3) des contraintes professionnelles pouvant potentiellement faire obstacle à l'utilisation d'une carte des inondations historiques. Les éléments relatifs à ces thèmes ont été systématiquement notés et sont présentés dans les sections I.3.2 et I.3.3.

3.1.2. Analyse des pratiques et des profils d'utilisateurs par entretiens individuels directifs

Pour compléter l'observation directe, une analyse des pratiques a été menée sous la forme d'entretiens directifs. L'analyse des pratiques avait pour objectif d'identifier les actions réalisées au quotidien par les agents de SNCF Réseau en relation avec la thématique des inondations.

Compte tenu de la diversité des métiers gravitant autour de la problématique des inondations, il était difficile de mener une analyse des pratiques exhaustive dans l'entreprise.

Le public cible de l'analyse des pratiques a donc été restreint aux hydrologues et hydrauliciens³ du département « Lignes, Voies et Environnement » de la Direction de

³ Les hydrauliciens sont les techniciens ou ingénieurs spécialisés en mécanique des fluides. Bien qu'ils soient tous deux hydrauliciens au sens strict, on distingue le métier d'hydrologue, qui étudie plutôt les flux d'eaux

l'Ingénierie SNCF. L'outil de valorisation des inondations historiques sera prioritairement adapté à ce public cible.

Ce public a été choisi pour son accessibilité, grâce à ses nombreuses interactions de travail avec l'équipe dans laquelle se déroulait la thèse, et parce que l'observation directe avait révélé qu'il a régulièrement l'usage d'informations sur les inondations historiques. Cibler un public d'utilisateurs dont on sait qu'il est intéressé maximise les chances qu'il utilise effectivement l'outil développé, voire peut ensuite aider à le promouvoir vers d'autres groupes d'utilisateurs (Duarte, 2010, chapitre 3).

Le panel de l'analyse des pratiques était constitué de 6 participants, hydrologues et hydrauliciens. Ils ont été interviewés lors d'entretiens directifs, à partir d'une trame de questionnaire, d'une durée d'une heure. Le questionnaire abordait les points suivants :

- Quelle utilisation avez-vous des informations sur les inondations historiques ? Dans quels contextes ? Pour remplir quelles tâches ?
- Quelle habitude avez-vous des cartes papier et/ou interactives ? Pour quels contextes d'utilisations ? Quelles sont vos préférences ?

Les deux groupes de questions visaient à identifier des tâches précises réalisées sur le thème des inondations, avec l'information historique d'une part et avec des supports cartographiques d'autre part. Cela permettait de compléter la liste des utilisations assez génériques de l'information sur les inondations historiques relevées par observation directe.

Le niveau de familiarité des participants avec les cartes géographiques renseignait sur le support et la forme des représentations cartographique qui pourraient être adaptées à ce public. Selon que le public est plutôt novice ou expert en cartographie et en informatique, l'interface sera conçue différemment pour être utilisable. L'expertise en informatique et en cartographie est un facteur fluctuant puisque les agents peuvent se former, changer de service,... Il est donc probable que les deux profils cohabitent. C'est ce que visait à révéler cette analyse.

3.1.3. Réunion d'intelligence collective sur l'organisation du système ferroviaire en cas de crise d'inondation

Une réunion d'intelligence collective a été organisée pour réunir des personnes de métiers divers autour d'une production commune, ici l'identification des impacts des inondations sur le système ferroviaire. Cet atelier a réuni une trentaine de participants en provenance de 10 directions des trois EPIC SNCF.

La réunion d'une demi-journée était composée de deux parties :

- La première partie visait à identifier les composants du système ferroviaire qui sont

naturels (eaux de ruissellement, cours d'eau, sous-sol...), du métier d'hydraulicien qui se concentre sur le domaine urbain et les réseaux d'assainissement.

vulnérables aux inondations. Elle a permis de dresser une typologie des objets ferroviaires et de leur vulnérabilité face aux inondations. Ces résultats ont été largement employés pour bâtir le modèle de données des impacts des inondations, que nous aborderons dans le chapitre III. La méthodologie adoptée dans cette partie sera donc présentée dans la section III.4.1.

- La seconde partie de la session collaborative visait à identifier les acteurs et les processus de gestion des incidents dus aux inondations. L'objectif était de déterminer comment les agents se mobilisent en cas de survenue d'une inondation, du constat de l'incident jusqu'au retour à la normale des circulations. Les résultats nous ont permis d'une part d'organiser la collecte de données d'entrée, grâce à l'identification des acteurs ferroviaires susceptibles de conserver des archives sur le sujet. D'autre part, cela nous a permis de mieux connaître le rôle, en cas de crise d'inondation, du public auquel nous avons finalement choisi de nous adresser.

Dans cette seconde partie, quatre groupes de travail, composés de 7 à 8 participants, devaient construire un graphique recensant les acteurs impliqués dans la gestion des inondations et leurs interactions, en s'inspirant du format du diagramme de séquence UML (OMG, 2015). Dans le formalisme UML, un *diagramme de séquence* sert à décrire un processus impliquant des acteurs et leurs productions (ex : Figure 1.2). Les acteurs et les produits sont placés en haut du schéma, alignés horizontalement. La dimension verticale du schéma représente l'ordre chronologique des actions des acteurs. Les actions d'un acteur donné sont représentées à la verticale de celui-ci, le long d'une ligne qui relie l'acteur au bas du schéma. Le texte décrivant les actions est généralement inclus dans des rectangles. Les flux d'informations ou de produits entre acteurs sont représentés par des flèches, allant de la ligne verticale d'un acteur à celle d'un autre acteur. Une action B postérieure dans le temps à une action A sera toujours représentée plus bas sur le schéma que l'action A. De même pour l'ordre des flux entre acteurs.

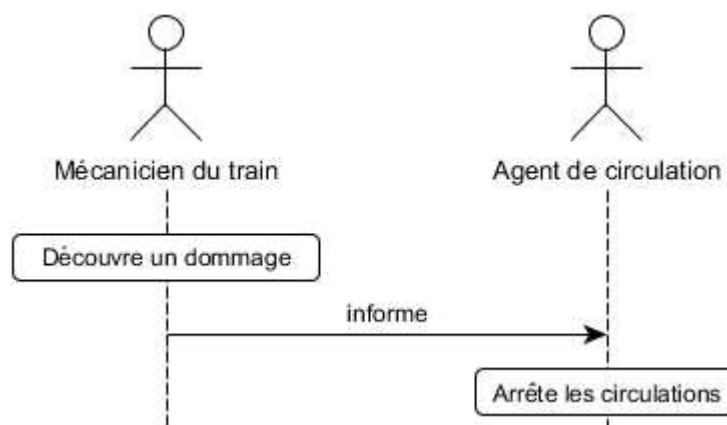


Figure 1.2. Exemple de diagramme de séquence en UML

Les termes « diagramme de séquence » et « UML » n'ont pas été employés durant l'atelier pour éviter de compliquer l'explication pour ceux ne maîtrisant pas le formalisme UML. Un

exemple concret de remplissage du schéma a été décrit en début d'atelier, afin de donner les bases du formalisme commun à chacun. Des post-it® ont été distribués à chaque groupe, certains pré-remplis pour donner des idées aux participants : des post-it bleus pour indiquer les acteurs et des post-it jaunes pour classer les étapes du processus de gestion de l'inondation (ex : alerte, cellule de crise, travaux,...). Le déroulement de l'atelier était constitué de 20 minutes de travail de groupe, puis d'une phase d'espionnage de 5 minutes où chacun des groupes pouvait envoyer un « espion » inspecter les autres tables afin d'enrichir la réflexion, et enfin de 10 minutes pour finaliser le schéma.

La mise en œuvre de ces trois méthodes d'analyse a permis de cerner : 1) un profil d'utilisateur principal, auquel sera adaptée notre proposition, 2) des scénarios d'utilisation de l'information sur les inondations historiques, 3) des besoins en informations et 4) les pratiques actuelles et la manière de s'adapter au public principal. Ces résultats sont décrits dans les sections suivantes.

3.2. Les contextes d'usage d'informations historiques sur les inondations

Le public principal à qui nous avons choisi d'adapter notre méthode cartographique est constitué des experts en hydrologie et hydraulique appartenant à la Direction de l'Ingénierie SNCF (cf. section I.3.1.2).

Grâce à l'observation directe, trois contextes d'usage de l'information historique sur les risques naturels ont été identifiés pour le public cible :

- Connaître et gérer le patrimoine ferroviaire : en marge des inondations, il s'agit de gérer les ouvrages (ouvrages d'art, ouvrages en terre et ouvrages hydrauliques), connaître leurs caractéristiques techniques, leur résilience face aux phénomènes naturels, de planifier les tournées d'inspection et de décider de l'installation de dispositifs de surveillance. Pour cela, il faut connaître l'histoire des ouvrages (les événements qui les ont touchés, les études réalisées, les modifications qu'ils ont subies). La connaissance du patrimoine passe aussi par la réalisation de diagnostics de tronçons ou d'analyses de risques : ces missions d'expertise visent à recenser tous les événements de dommages connus, pour repérer des motifs de zones souvent endommagées et ainsi prendre des décisions de maintenance par exemple.
- Produire des études techniques : ce type d'étude, généralement réalisé en temps limité, répond à une demande spécifique d'un autre service. Elle peut survenir suite à une inondation, dans la phase de remise en état des infrastructures : donner un avis sur le niveau de risque suite à un incident et les conditions de reprise de la circulation, étudier la faisabilité technico-économique de travaux. Ces études vont mobiliser les données sur l'historique des dommages et les travaux de modification d'un ouvrage.
- Mettre en place des stratégies : il s'agit de préparer la gestion de crise avant l'événement, de décider de procédures de construction et de maintenance des voies,

des itinéraires de substitution à emprunter pour les circulations, en se basant en partie sur la connaissance des événements passés.

L'outil actuellement le plus utilisé dans l'entreprise pour réaliser ces tâches est le Retour d'Expérience (REX).

Le *retour d'expérience* est une approche de maîtrise du risque appliquée suite à un événement dommageable : « il permet de comprendre un enchaînement de faits ayant conduit à un événement redouté et d'en dégager des recommandations d'amélioration ou des bonnes pratiques en termes de conception et de pilotage du système ou de la crise » (Chapurlat et Aloui, 2007). Les étapes principales de la réalisation d'un REX sont : 1) la collecte de données sur l'événement dommageable et 2) la rédaction d'une note de synthèse listant les recommandations et les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

Cet outil satisfait au besoin des agents mais la donnée se présente souvent sous un format tableur ou bien textuel et est souvent répartie dans plusieurs sources d'information organisées par métier ferroviaire (ex : REX ouvrage d'art, REX ouvrage en terre, REX voies et abords, REX gestion de crise, etc.). Ces formats ne permettent pas de percevoir facilement la dimension spatiale des événements, au moment de la collecte et de la réutilisation de ces informations. L'ancrage des événements dans le territoire peut pourtant s'avérer utile pour comprendre leur enchaînement et leurs causes. L'association de cartes aux REX permettrait d'enrichir l'analyse des inondations historiques, grâce à la valorisation de la dimension spatiale de l'information.

La forme cartographique se pose donc comme une méthode de valorisation pertinente des informations historiques sur les inondations.

Les experts hydrologues et hydrauliciens peuvent aussi être sollicités lors de la gestion de crise d'une inondation. Les actions qu'ils peuvent être amenés à remplir sont :

- Donner un avis sur le niveau de risque suite à un incident et les conditions de reprise de la circulation, dans les cas techniques complexes,
- Réaliser des études et des diagnostics sur : la régénération d'ouvrages, leur sensibilité au risque,...
- Alimenter les outils de REX après des incidents sur le réseau,
- Alimenter/modifier les référentiels techniques et de procédures, légiférant la construction et la maintenance des voies ferrés.

Les informations sur les inondations historiques identifiées comme nécessaires pour chaque cas d'usage expert ont été listées par thème dans le Tableau 1.1. Ces cas correspondent à des profils et des tâches très différents. En effet, les experts en hydrologie et hydraulique endossent tour à tour plusieurs casquettes suivant leur contexte de travail : chargé d'étude, gestionnaire d'information, expert technique du risque ou intervenant en gestion de crise.

Parmi ces contextes d'utilisation, il convenait donc d'identifier ceux auxquels notre outil de valorisation choisirait de s'intéresser. Une réunion avec les commanditaires du projet a permis de cibler les objectifs jugés les plus importants pour une première cartographie des impacts des inondations historiques (en gras dans le Tableau 1.1). Il s'agit d'usages relatifs à la conservation du patrimoine ferroviaire et à la maintenance de l'infrastructure.

Tableau 1.1 : Besoins d'informations et d'analyses sur les inondations historiques majeures dans divers cas d'usage (les items en gras ont été jugés comme étant les plus importants par les experts métier associés au projet)

Usages en Maintenance/Régénération	Usages sur le Patrimoine	Usages sur la Gestion de crise	Analyses	Fonctions interactives associées
<ul style="list-style-type: none"> - Quelles actions, décisions de maintenance ont été prises en post-crise ? - Cause du choix d'une solution de réaménagement plutôt qu'une autre 	<ul style="list-style-type: none"> - Effet de la succession des événements sur le long-terme - Points sensibles du réseau et critères de sensibilité - Vulnérabilité de chaque objet ferroviaire face aux crues - Sans mémoire des événements, risque de prendre des solutions techniquement inappropriées à certains endroits 	<ul style="list-style-type: none"> - S'inspirer des solutions prises par le passé - S'inspirer des méthodes de gestion des circulations pendant l'événement - Régularité et modes de circulation pendant l'événement - Aspects économiques et sociologiques de la gestion de crise (dialogues avec les collectivités) - Impacts socio-économiques de l'arrêt de circulations sur le territoire 	<p><u>Synthèse :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Typologie des dommages rencontrés par objet ferroviaire et échelle d'intensité <p><u>Analyse :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Identifier les points sensibles du réseau (souvent impactés ou qui engendrent d'autres problèmes s'ils sont touchés) 	<ul style="list-style-type: none"> - Consulter les objets par métier du domaine ferroviaire - Afficher les incertitudes des données à l'extérieur de la carte (ex : infobulle) - Bien séparer causes, dommages et réparations

3.3. Les besoins en informations : visualiser le récit des événements historiques

La liste des informations et données utiles sur les inondations dans le contexte ferroviaire a été triée pour ne retenir que les items cités souvent par les agents au cours des entretiens et des réunions. Elle est présentée dans le Tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Données qu'il serait utile d'intégrer dans une carte des inondations historiques majeures (les items en gras ont été jugés comme étant les plus importants par les experts métiers associés au projet)

Objets ferroviaires	Environnement	Dommages	Métadonnées
<ul style="list-style-type: none"> - Installations de gestion du réseau : sous-stations, poste d'aiguillage et leurs périmètres d'action - Passages à niveaux (points de passage de l'eau) 	<ul style="list-style-type: none"> - Récit de l'inondation - Causes hydro-climatiques de l'inondation - Type de crue - Type d'événement climatique - Evolution du territoire entre la survenue de l'événement et actuellement 	<ul style="list-style-type: none"> - Type de dommage - Gravité du dommage - Localisation (point kilométrique) et date des dommages - Ouvrages non touchés dans les zones impactées (résilients) - Enchaînement des incidents (effets dominos) - Date de début du désordre - Date de remise en circulation - Durée de réparation des ouvrages - Statistiques sur la ligne : nombre de circulations impactées, ... 	<ul style="list-style-type: none"> - Méthode de reconstitution et/ou de synthèse des données anciennes - Sources des données sur les événements et sur la topographie - Précision des données - Causes de l'imprécision des données
<p>DONNEES SOCIO-ECONOMIQUES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coût des impacts (coût de travaux et de non-circulation) - Contenu des dialogues avec les collectivités sur les enjeux 			

Les données listées ci-dessus ne pourront pas toutes être visualisées dans la carte, en raison de leur quantité et de la difficulté d'accès à certaines. Néanmoins, certaines informations ressortent, qui concordent avec les scénarios d'usage retenus pour notre public principal (rapportés dans la section I.3.2) :

- visualiser les objets à enjeu de l'infrastructure ferroviaire,
- visualiser le récit de l'inondation, les causes hydro-climatiques, les types de dommages et leur gravité,
- visualiser la gestion de la suite des dommages en période post-crise,
- accéder à l'historique des travaux sur les ouvrages et les raisons des choix techniques.

Ces éléments coïncident en fait avec ceux présents dans un retour d'expérience. Cela confirme l'apport de notre méthode de valorisation cartographique évoquée dans la section précédente.

La carte que nous proposons constituerait un outil de retour d'expérience qui rapporte le récit des événements historiques. Cet outil cartographique augmenterait les REX habituels en apportant : 1) un format visuel et spatialisé des événements et 2) un contenu inter-métier, qui met en valeur l'impact systémique des inondations.

En adjoignant des fonctions d'interactions à la carte, celle-ci pourrait porter des fonctions de consultation et d'analyse des récits des inondations passées et des dommages, constituant le REX.

Une carte interactive donnant à voir les données historiques serait-elle utilisable par notre public cible ? Ce type d'outil s'intègre-t-il dans leurs habitudes de travail ? C'est ce que nous avons cherché à définir à travers l'analyse des pratiques, dont les résultats sont communiqués dans la section suivante.

3.4. Familiarité des experts avec les cartes interactives

Pour créer une carte de récit adaptée à notre public cible principal (constitué d'experts techniques, hydrologues et hydrauliciens, spécialistes du système ferroviaire) il est utile de connaître leur niveau d'expertise dans différents domaines liés au jeu de données à visualiser. Deux points ont notamment été explorés dans une analyse des pratiques : leurs habitudes d'usage de cartes et leur aisance avec les outils informatiques interactifs. Les résultats principaux repris dans cette section permettent de vérifier qu'une carte interactive s'inscrit dans les pratiques métiers actuels des experts et peut donc être utilisable.

Six hydrologues et hydrauliciens experts du système ferroviaire ont été interviewés au cours d'entretiens individuels directifs. Tous les experts interrogés utilisent régulièrement des informations historiques dans leurs tâches métiers. Ils sont donc a priori habitués aux données historiques et à leurs caractéristiques spécifiques. Si les personnes interrogées sont toutes expertes dans le domaine des inondations, leur niveau de maîtrise des cartes et de

l'informatique varie.

3.4.1. Utilisation des cartes

Les cartes sont un outil de travail familier pour les experts, qui les utilisent tous une à plusieurs fois par semaine. Ils les utilisent notamment pour :

- localiser des objets (ex : ouvrage ferroviaire) ou des phénomènes (ex : cartes de précipitations),
- rechercher des itinéraires,
- collecter des données (ex : nature pédologique, occupation du sol,...), qui sont ensuite intégrées dans d'autres études.

Les experts sont amenés à utiliser des cartes interactives pour ces tâches, notamment des géoportails renommés où ils sont sûrs de trouver les informations recherchées : les cartes géologiques du BRGM⁴, Google Maps⁵ et le Géoportail⁶ de l'IGN ont notamment été cités.

Seulement deux des six interviewés disent utiliser des cartes pour analyser ou comprendre des processus et seulement un en utilise pour explorer des données dans le but de révéler des informations inconnues.

Les utilisations de cartes majoritaires correspondent donc à des usages simples de présentation de données, nécessitant usuellement un faible niveau d'interactivité. Les experts semblent cependant en majorité habitués à utiliser des cartes interactives, ce qui plaide en faveur du développement d'une carte interactive montrant des récits d'inondations historiques. Cette carte interactive pourrait intégrer des fonctionnalités de recherche de données et d'export du contenu vers d'autres formats afin de répondre aux usages actuels de données géographiques. Des fonctionnalités d'analyse et d'exploration, plus poussées, pourraient être un vecteur de diversification des usages, bien que les utilisateurs n'y soient pas habitués à ce jour. L'interface développée devra donc rester simple à utiliser.

3.4.2. Utilisation de l'informatique

Tous les interviewés utilisent l'informatique au quotidien. Une seule des six personnes interrogées a semblé peu à l'aise avec les logiciels informatiques. Les logiciels SIG, les logiciels de modélisation hydrologique et les logiciels de conception assistée par ordinateur (ex : AutoCAD®) sont chacun utilisés par trois participants sur six. Ces trois types de logiciels intègrent tous une composante spatiale.

Finalement, cinq participants sur six ont donc l'habitude d'utiliser des outils informatiques

⁴ Les cartes géologiques sont majoritairement consultées sur papier, mais un visualiseur en ligne existe également : <http://infoterre.brgm.fr/>

⁵ <http://maps.google.com>

⁶ <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>

dans leur travail et cinq sur six utilisent régulièrement des logiciels manipulant des données géographiques. Ces résultats sont encourageants sur la capacité des utilisateurs à naviguer dans une carte interactive.

3.5. Synthèse

Au regard des pratiques et des besoins des experts interrogés, une méthode efficace pour valoriser les informations historiques sur les inondations serait un outil de retour d'expérience (REX). Un manque identifié dans les REX actuels référençant les dommages au système ferroviaire est l'absence de valorisation de la dimension spatiale de l'information. Or la dimension spatiale associée aux événements issus de risques semble capitale pour analyser leur ancrage dans un contexte territorial et également la dynamique des processus de risques.

Sur la base de nos résultats, nous préconisons d'associer systématiquement une dimension spatiale aux REX sur les risques, par l'intermédiaire d'une interface cartographique interactive. L'ajout de l'interactivité à la représentation cartographique est susceptible d'amplifier les capacités de l'humain pour détecter des motifs, établir des liens et réaliser des inférences (G. Andrienko et al., 2010), ce qui sera développé dans le chapitre II.

L'analyse des tâches et des besoins avait pour but d'identifier les informations *utiles* aux experts cibles. Notre objectif est également que l'outil cartographique produit soit *utilisable*, c'est-à-dire que la représentation cartographique soit lisible, d'une part, et adaptée à notre public cible d'autre part. Les cartes sont largement utilisées dans le domaine des risques naturels. La construction d'une carte de REX, qui soit lisible et utilisable, peut s'appuyer sur les développements antérieurs en cartographie, notamment appliquée aux risques naturels. Le chapitre suivant présente les principes guidant la construction de cartes et leur application dans le domaine des risques et auprès de différents publics d'utilisateurs.

II/ Cartographie et risques naturels

L'étude des risques naturels doit s'appuyer sur la maîtrise d'une grande quantité d'informations géographiques. Les risques naturels ont un caractère éminemment spatial : ils s'inscrivent dans un territoire, dans leur ampleur et leur processus, et menacent des aires identifiées. C'est pourquoi les cartes géographiques sont très employées pour étudier ces risques.

De nos jours, en France, les cartes de risques sont utilisées à une multitude d'échelles, du niveau national au niveau local. Des entretiens et ateliers avec des responsables du risque inondation ont par ailleurs montré que ce public préfère le format des cartes à d'autres livrables pour visualiser le risque (V. Meyer et al., 2012; cité par Scheuer et al., 2013).

Ce chapitre vise à décrire ce qu'est l'objet « carte », les concepts qui lui sont liés, et comment la carte s'applique dans le domaine d'étude des risques naturels. La carte est un outil de transmission d'informations, qui suit des règles établies pour que le message qu'elle porte soit lisible et compréhensible par le lecteur.

1. Notions générales de cartographie

La discipline de la cartographie peut être définie comme « l'art, la technique et la science d'élaborer des cartes, c'est-à-dire des représentations de l'espace géographique qui sont communicables » (Ferland, 2000). Cette définition met en avant que la carte a une double dimension : à la fois technique, mais aussi artistique. Cela tient au fait qu'elle est une image et fait donc appel à des mécanismes de lecture similaires à la vision d'une peinture ou d'une photographie par exemple. En tant que discipline scientifique, elle se pose également comme représentation objective du réel.

La production de la carte s'appuie sur des méthodes formalisées visant à garantir sa rigueur scientifique et la transmission correcte du « message cartographique », signal forcément perturbé par la sélection des objets représentés dans la carte et par le pouvoir de l'image. Ces dimensions sont présentées ci-après.

1.1. Les composants de la carte

1.1.1. Une représentation graphique de l'espace

La production d'une carte se base sur un certain nombre de prérequis techniques que le cartographe doit maîtriser, afin de produire une représentation graphique fidèle de l'espace.

La première étape est le choix d'une projection cartographique adaptée, de façon à réduire au minimum la déformation de l'espace, occasionnée par la projection du globe sur une

surface en deux dimensions.

Ensuite, les éléments du territoire doivent subir des transformations avant de pouvoir être intégrés dans la carte. Cauvin et al. décrivent la carte comme « un modèle conceptuel d'un espace donné, impliquant une réduction (exprimée par une échelle), une simplification [et] une généralisation de cet espace » (Cauvin et al., 2007, p. 58). Selon cette définition, la première caractéristique de la carte est qu'elle représente l'espace à une *échelle réduite*, permettant de mettre l'ensemble de ce territoire à la portée d'un regard. Cette miniaturisation a pour effet de rendre certains objets trop petits pour être visibles à l'œil nu (la taille minimale d'un objet perceptible par l'œil est de 0,1 mm) ou trop proches pour pouvoir distinguer qu'il s'agit de deux objets différents (la distance minimale perceptible entre deux figurés voisins est de 0,2 mm) (Rouleau, 1991; Ruas, 1999). En changeant d'échelle, il va donc être nécessaire de *généraliser* les objets cartographiques, c'est-à-dire diminuer leur niveau de détail en ne gardant que leurs traits les plus caractéristiques (Figure 1.3).



Figure 1.3. Exemple de généralisation cartographique (Duchêne, 2004)

Une étape de sélection des objets à représenter dans la carte est également nécessaire, principalement pour des raisons de clarté. Co-visualiser trop d'objets dans une surface restreinte peut conduire à des conflits graphiques : superposition d'informations, surcharge de la carte et problèmes de lisibilité (facilité à lire l'information). Les données superflues peuvent distraire l'attention du lecteur et nuire à la compréhension du message communiqué. Enfin, la surcharge en informations risque de brouiller le message important et nuit à l'aspect esthétique de la carte, donc à l'envie que le lecteur aura de la lire. La sélection cartographique s'opère en ôtant de la carte tous les objets qui ne sont pas pertinents au regard de son objectif. Une illustration de sélection d'informations est présentée sur la Figure 1.4.

Parmi les cartes représentant le territoire, on distingue généralement les cartes topographiques et les cartes thématiques, qui diffèrent par la sélection de leur contenu. Les *cartes topographiques* visent à représenter les éléments naturels et artificiels situés sur la surface terrestre, ainsi que les formes du terrain (AFT, 2000). Les *cartes thématiques*, quant à elles, mettent en valeur certains objets et informations pour communiquer sur un thème spécifique (Cauvin et al., 2007).

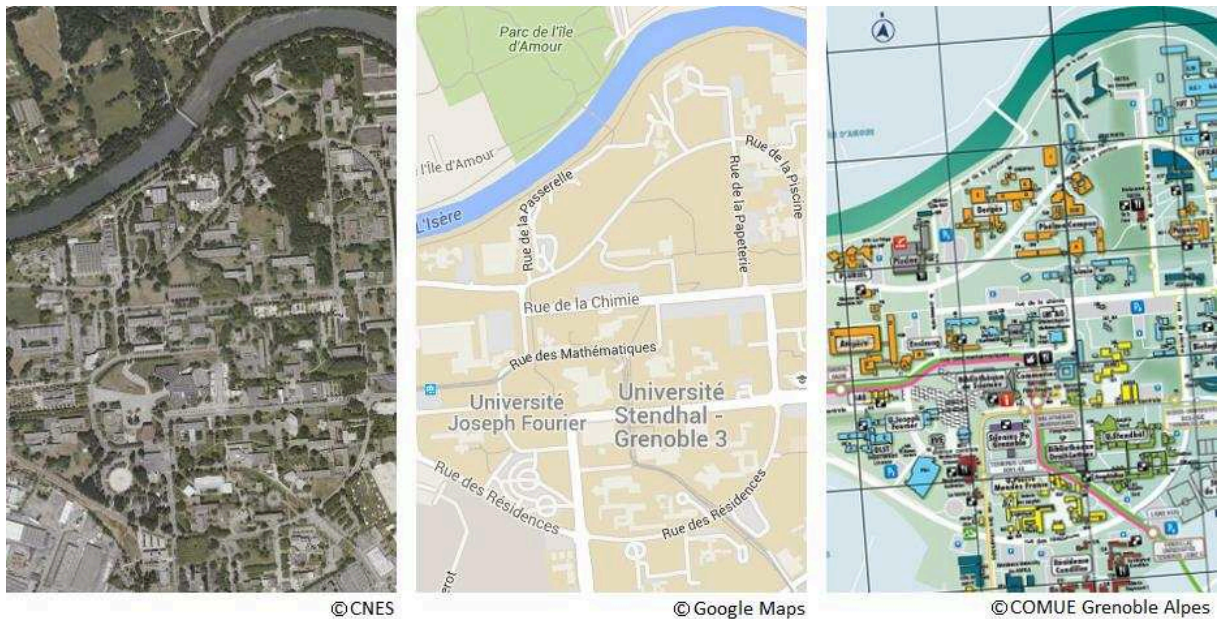


Figure 1.4. Exemple de deux cas de sélection d'objets géographiques par rapport à l'ensemble des objets visibles sur la photographie aérienne (image de gauche) du campus universitaire de Grenoble : tout en représentant sensiblement les mêmes objets, la carte du milieu met plutôt l'accent sur les routes et chemins, tandis que la carte de droite met en valeur les ensembles de bâtiments par établissement de rattachement (couleurs).

Les étapes de projection, de sélection et de simplification sont un prérequis au développement de toute représentation cartographique.

1.1.2. La sémiologie graphique

La carte représente les objets du monde réel par un ensemble de symboles. Ils constituent un langage visuel, à la manière des mots dans le langage écrit : chaque symbole possède une forme (signifiant) et désigne un concept (signifié) (de Saussure, 1916). Les symboles constituent donc des clés de lecture qui vont permettre au lecteur de comprendre la carte : « Etant donné que tel signe signifie telle chose, quelles sont les relations qui s'établissent entre tous les signes, entre toutes les choses représentées ? » (Bertin, 1967).

Des règles ont été élaborées pour guider le cartographe dans le choix de symboles appropriés, pour 1) ne pas communiquer une information contradictoire à celle attendue et 2) utiliser des symboles compréhensibles intuitivement par le plus grand nombre. L'ensemble de ces règles est appelé la *sémiologie graphique* (le terme « sémiologie » désignant la science des symboles), qui a été formalisée par Jacques Bertin (1967).

Les variables visuelles

Bertin (1967) définit 7 *variables visuelles*, c'est-à-dire des caractéristiques susceptibles de s'appliquer aux symboles (Figure 1.5) :

- la localisation dans le plan,

- la couleur,
- la valeur de la couleur (de clair à foncé),
- l'orientation,
- le grain,
- la taille et
- la forme des symboles.

Il classe aussi ces variables visuelles en fonction de leurs pouvoirs de communication :

- La taille s'applique à la représentation de données *quantitatives*,
- La taille, la valeur de la couleur et le grain peuvent exprimer une relation d'*ordre*,
- Le grain, la couleur, l'orientation et la forme sont performants pour *associer* visuellement des objets semblables,
- La taille, la couleur, la valeur de la couleur, le grain et l'orientation ont un pouvoir de *différenciation* des objets dissemblables.

Dibiase et al. (1992) reprennent ces lois et préjugent de leur efficacité en fonction de la nature des données cartographiées, qui peuvent être nominales (qui expriment des catégories), ordinales (qui expriment un ordre ou une quantité) ou des ratios (exprimant un pourcentage) (Figure 1.5).

	Point features	Line features	Area features	Nominal data	Ordinal data	Interval/Ratio data
POSITION				Effective	Effective	Effective
SIZE				Not Effective	Effective	Effective
VALUE				Not Effective	Effective	Marginally Effective
TEXTURE				Effective	Marginally Effective	Not Effective
HUE				Effective	Marginally Effective	Not Effective
ORIENTATION				Effective	Not Effective	Not Effective
SHAPE				Marginally Effective	Not Effective	Not Effective

Figure 1.5. Variables visuelles de la sémiologie graphique et efficacité selon la nature des données (Dibiase et al., 1992)

Spécificités de la couleur

La variable « couleur » est une variable visuelle un peu particulière. Elle porte en effet un pouvoir symbolique et peut générer des émotions, qui varient selon les cultures et les individus (Chesneau, 2006). Par exemple, dans la culture occidentale, la couleur rouge peut évoquer la colère ou le danger. Les couleurs ont aussi un pouvoir évocateur qui rappelle celles rencontrées dans la nature, et qui, soigneusement choisies, peuvent être utilisées pour accélérer la compréhension des cartes (Chesneau, 2006) : bleu pour l'océan, vert pour la forêt, etc.

Bertin (1967) formalise l'ensemble des couleurs en un couple « teinte + valeur ». D'autres modèles de la couleur, adaptés aux technologies informatiques, ont été développés depuis. On peut par exemple citer le modèle TSL (pour « Teinte, Saturation, Luminosité ») (Smith, 1978), utilisé notamment dans les logiciels de graphisme, qui décompose la couleur en trois paramètres (Figure 1.6) :

- la *teinte*, qui différencie les couleurs entre elles,
- la *saturation*, qui correspond à la quantité de couleur ajoutée à une base blanche (soit la quantité de pigment apposée sur une image en noir et blanc) ; une couleur saturée sera très vive, une couleur faiblement saturée sera grisée,
- la *luminosité*, ou *intensité*, qui correspond à l'inverse de la quantité de noir ajoutée à la couleur ; une couleur de forte luminosité sera claire, une couleur de faible luminosité sera sombre à noire.

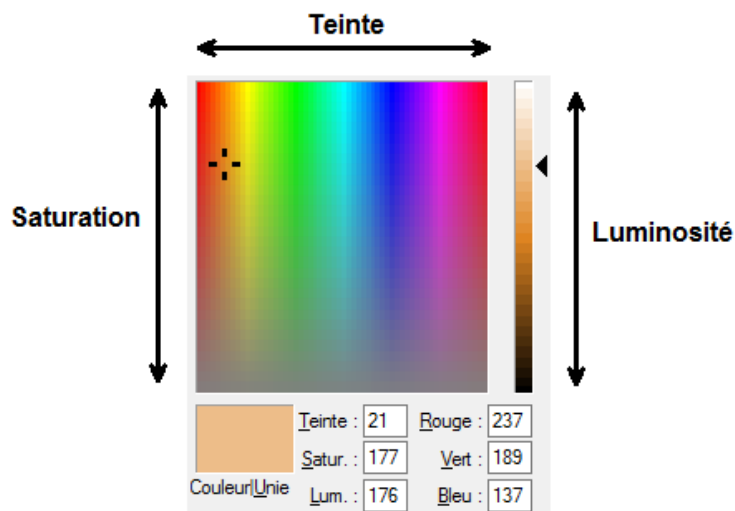


Figure 1.6. Palette de choix des couleurs intégrant le modèle TSL dans le logiciel Microsoft Paint©

Selon Chesneau (2006, p.123), qui s'est intéressée au contexte des cartes de risques, la saturation de la couleur permet de distinguer efficacement les éléments importants de la carte, auxquels seront attribuées des couleurs saturées, des éléments du contexte appartenant au fond de la carte, auxquels seront plutôt attribuées des couleurs grisées. Pour améliorer la lisibilité des cartes, Chesneau conseille d'associer « grande intensité + saturation faible » pour signifier une valeur d'indicateur faible et « luminosité faible + saturation forte » pour indiquer une valeur élevée.

Forme abstraite ou iconique

Les symboles en implantation ponctuelle utilisés dans les cartes peuvent être classés en deux catégories selon leur forme. On oppose les symboles dits abstraits, employant des formes géométriques ne présageant pas de leur signification (ex : carré, disque, triangle), et les symboles iconiques, ressemblant aux objets qu'ils représentent (ex : tente pour un camping, bateau pour un port) (Figure 1.7).

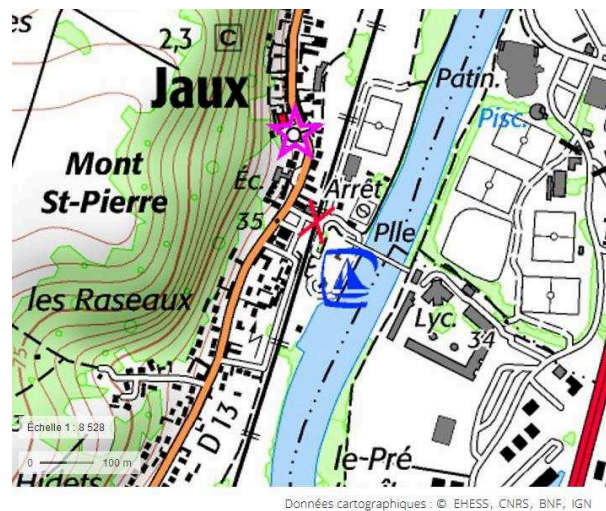


Figure 1.7. Exemple d'usage d'un symbole abstrait (étoile) indiquant un bâtiment remarquable et d'un symbole iconique (bateau) indiquant un port de plaisance (Source : geoportail.gouv.fr)

Il existe deux sous-catégories de symboles iconiques (Weger, 1996) (Figure 1.8):

- Les symboles figuratifs, qui sont des dessins aux traits simples,
- Les symboles évocateurs, qui sont plus stylisés.

Les symboles iconiques peuvent également être emblématiques, c'est-à-dire faire appel à des références culturelles, ce qui implique la mise en œuvre de processus cognitifs différents (Slocum et al., 2001). Les symboles iconiques (ex : une croix pour une église) sont efficaces car ils ressemblent à ce qu'ils représentent. Les symboles emblématiques, parmi lesquels la couleur, peuvent en revanche être interprétés différemment par les lecteurs selon leur culture et leurs connaissances.



Figure 1.8. Symboles iconiques figuratifs et évocateurs (Weger, 1996)

Ainsi, le cartographe peut suivre les règles proposées par la sémiologie graphique pour que les symboles choisis correspondent au mieux aux données représentées et, ainsi, éviter que le message qu'il souhaite transmettre soit mal interprété. Ces règles cartographiques concourent donc à produire des cartes utilisables.

Cependant, la carte n'est pas auto-suffisante pour transmettre le message du cartographe : pour la décoder, le cartographe doit fournir au lecteur des informations annexes qui constituent des clés de lecture.

1.1.3. Les éléments complémentaires de la carte

« Telle quelle, la carte, avec le langage spécifique qu'elle met en œuvre, ne se suffit pas à elle-même et nécessite des éléments complémentaires qui vont lui permettre d'être non seulement une image, mais un instrument d'information. » (Rouleau, 1991, p. 161, cité par Palka 2015).

Sans information annexe, il est difficile pour le lecteur d'interpréter tous les signes communiqués dans la carte.

Par exemple, le contenu et la symbologie de la carte de la Figure 1.9 ne sont pas auto-porteurs de sens : il est nécessaire de recourir à la légende voire d'effectuer des allers-retours visuels entre cette légende et le contenu cartographique pour décoder l'information qualitative portée par les symboles.

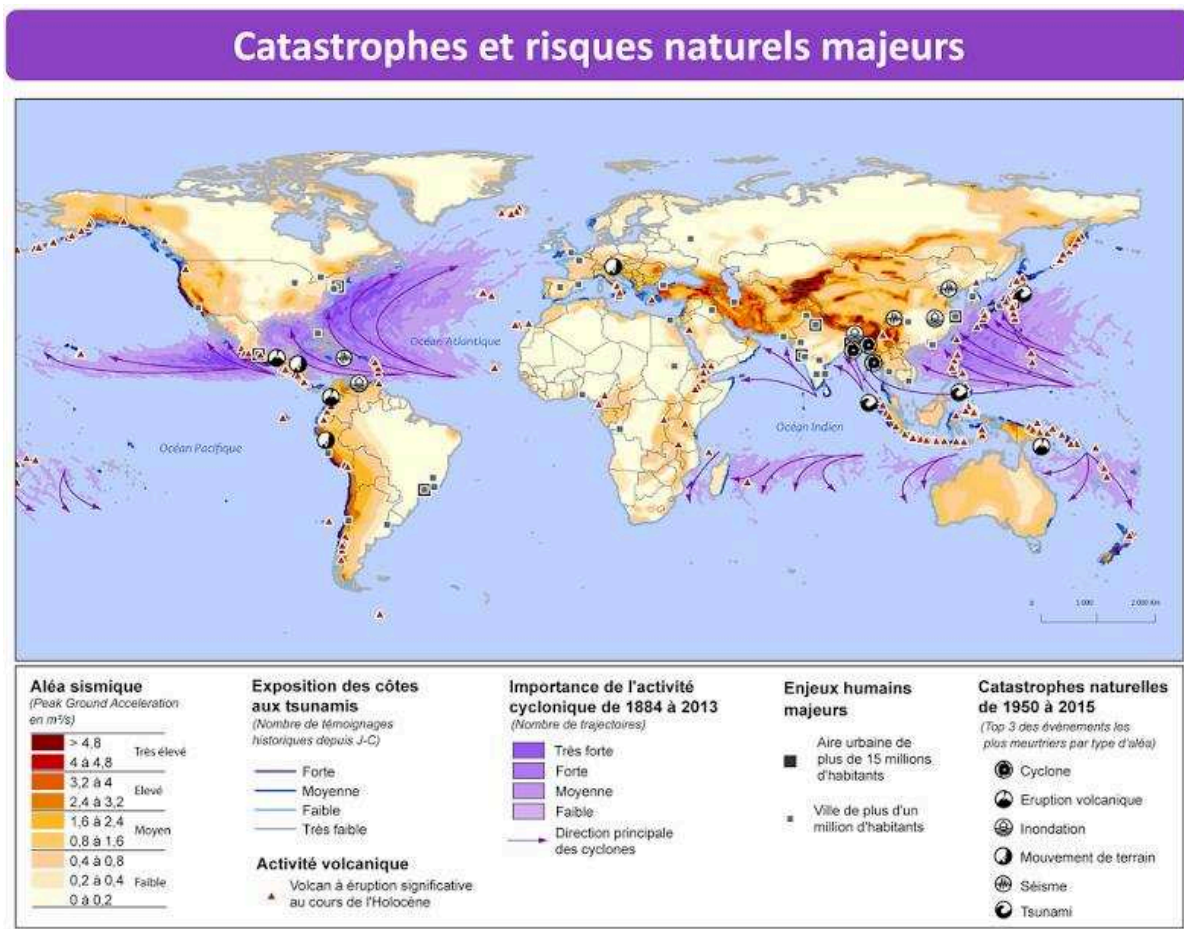


Figure 1.9. Exemple de carte où la légende joue un rôle majeur dans la compréhension du contenu (Source : Gustave et Pigeolet, 2015)

Cinq éléments sont essentiels à l'utilisation de la carte :

- Le *titre* communique le thème général de la carte. Il guide la compréhension du contenu.
- A une échelle infra-mondiale, une *flèche d'orientation* permet d'indiquer le nord géographique et aide le lecteur à se repérer.
- La *barre d'échelle* aide à évaluer les distances entre objets.
- L'indication de la *source* des données permet au lecteur de vérifier la qualité de l'information communiquée.
- Enfin, la *légende* assure la traduction des symboles figurant dans la carte.

Avec le titre, la légende est la clé de la traduction du contenu cartographique (voir Figure 1.9 à titre illustratif). Elle est organisée en thèmes, pour mettre en avant les relations d'association, d'ordre et de différence entre les rubriques (Chesneau, 2006).

Outre ces éléments essentiels, d'autres informations peuvent être ajoutées autour de la carte, pour préciser son contexte, par exemple la référence de la projection cartographique utilisée, la date de production de la carte ou encore la présence d'un carton de localisation

(carte miniature qui permet de situer la zone concernée par la carte principale dans son contexte spatial à plus petite échelle), comme l'illustre la Figure 1.10.

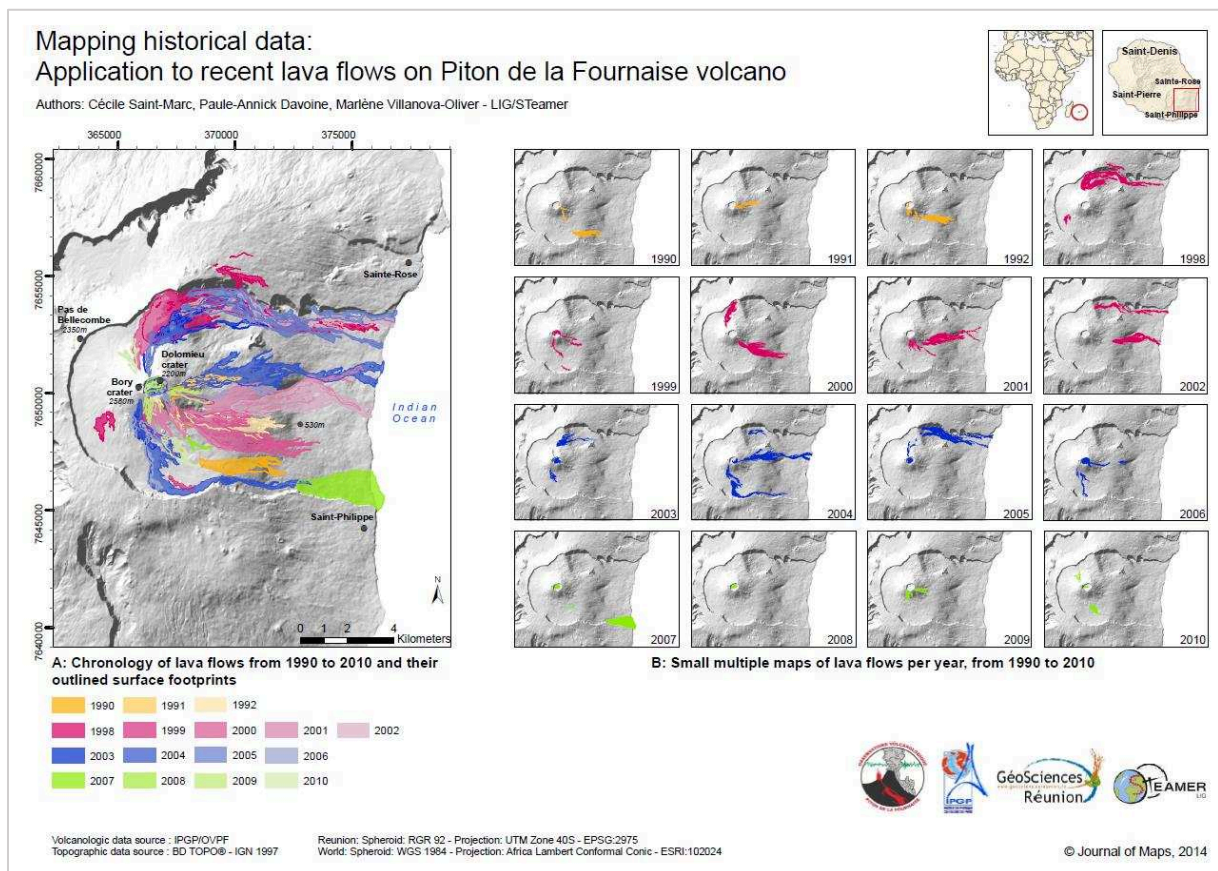


Figure 1.10. Exemple d'éléments complémentaires ajoutés à une planche cartographique : carton de localisation (en haut à droite), projection cartographique (en bas au milieu), coordonnées géographiques (bordures de la carte de gauche), logos des producteurs de données (en bas à droite) (Saint-Marc et al., 2014)

1.1.4. Le pouvoir des images et des cartes

La forme visuelle de la carte constitue un atout par rapport à d'autres modes de communication (texte, son). La vision est le sens le plus développé chez l'homme. Le nerf optique contient un million de fibres, contre trente mille pour le nerf auditif (Lieury, 2004). Un stimulus visuel est donc perçu et traité très efficacement par le cerveau.

Une image, et par extrapolation une carte, est d'abord perçue par le lecteur dans son ensemble avant d'accéder aux détails de l'information (Treisman, 1986), contrairement à la lecture des textes ou le langage oral, qui communiquent d'abord des morceaux d'information qui sont ensuite reliés mentalement par le destinataire pour reconstituer le message dans son ensemble. Les images et les cartes ont donc une certaine efficacité dans la transmission d'un message par rapport à d'autres médias de communication.

La visualisation d'informations a aussi un pouvoir de réduction et de simplification de

l'information qui permet de transmettre des messages complexes rapidement. Un exemple type est le quartet d'Anscombe (Anscombe, 1973) : pour comparer des séries de données numériques, l'analyste sera tenté de réaliser des statistiques descriptives. Cependant, ces statistiques peuvent se révéler insuffisantes. Sur la Figure 1.11, les quatre séries de données présentent exactement les mêmes propriétés statistiques (moyennes identiques, variances, coefficients de corrélation, droites de régression identiques...) alors que leur représentation sous forme graphique permet de détecter intuitivement et très rapidement les différences entre les séries.

Bertin (1967) avance que les graphiques et les cartes permettent de communiquer efficacement jusqu'à trois variables simultanées, c'est-à-dire trois caractéristiques des données : typiquement dans une carte, la localisation selon la latitude et la longitude et une autre caractéristique (date, quantité, qualité). Des travaux ultérieurs ont avancé que les cartes pouvaient communiquer jusqu'à 5 variables en même temps (Saint-Marc et al., 2015), même si la lisibilité de ces approches n'a pas été validée expérimentalement.

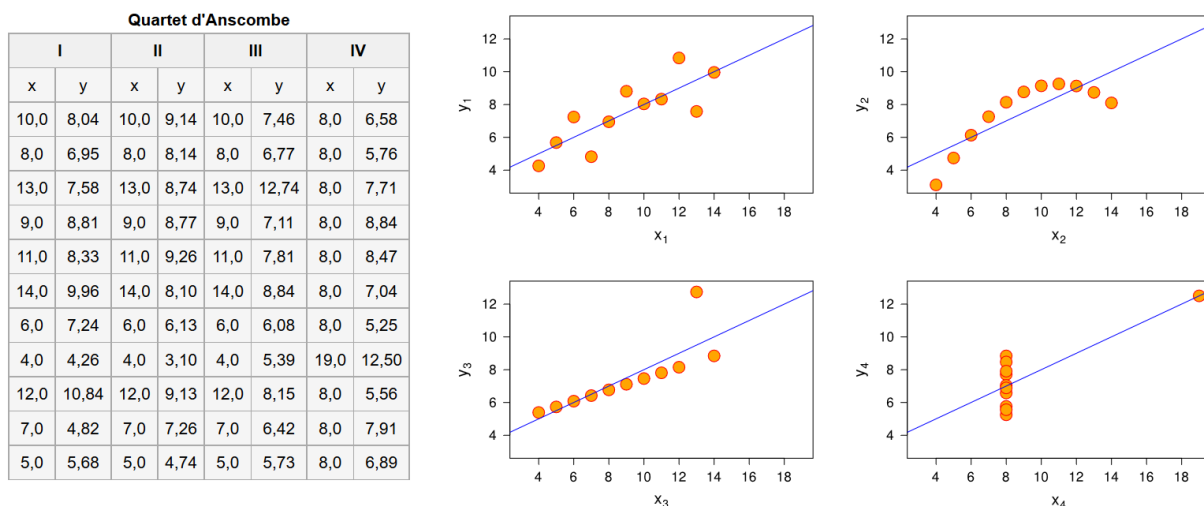


Figure 1.11. Données de référence et graphiques associés au quartet d'Anscombe⁷

Enfin, les images ont un pouvoir d'influence et de persuasion sur le lecteur. Cela tient à leur statut de vecteurs de communication, qui peuvent porter des preuves en faveur d'un certain discours, au même titre que les textes ou les chiffres statistiques (Pandey et al., 2014). L'image rend visible, donc palpable, la réalité communiquée. Dans le domaine de l'aménagement, Lussault (2003) soutient que le visuel jouit d'un « effet de vérité » lié à l'implicite des choix de son auteur. Cela a par exemple été vérifié lors de la présentation de cartes 3D du risque inondation à des élus, qui acceptent cette donnée sans la remettre en question (Jacquinod et Langumier, 2010). Or, cet effet peut être dangereux car, malgré la normalisation technique de la science cartographique et les efforts des cartographes, la carte n'est pas exempte de subjectivité.

⁷ Source des graphiques : https://fr.wikipedia.org/wiki/Quartet_d%27Anscombe

Selon Harley (traduit dans Gould et Bailly, 1995), la carte est une image chargée d'un jugement de valeur pour plusieurs raisons : elle est élaborée dans un certain contexte historique et politique qui l'influence et résulte de choix sur le contenu, les symboles et le style de représentation.

Harley a identifié plusieurs types de pouvoirs associés à la carte : la carte confère du pouvoir au lecteur, par la connaissance qu'elle communique, mais peut aussi être utilisée pour exercer du pouvoir sur le lecteur (Harley, 1992). En iconologie, on distingue deux niveaux d'interprétation des œuvres d'art (Panofsky, 1939) qui peuvent être transférés à la carte (Harley, 1988, p. 22) : la carte a un niveau de signification « superficiel », ou littéral, et un niveau « plus profond » attaché à la symbolique de l'acte d'émettre ou de recevoir un message. En d'autres termes, le fait de cartographier une certaine zone, une caractéristique géographique ou un lieu est porteur de sens. C'est à ce niveau symbolique, qui accompagne le message cartographié, que le pouvoir des cartes serait le plus efficacement communiqué et ressenti (Harley, 1988).



Même de simples cartes thématiques peuvent véhiculer de subtils messages de propagande. Cette carte d'un atlas scolaire, tirée de *Geschichtsatlas... Deutsch* (1933), représente les populations germaniques en Europe et outre-mer (dans l'encart), mais omet de donner une clé pour les trois tailles de symboles. Si la répartition est globalement réaliste, les minorités allemandes dans les pays européens étaient d'habitude beaucoup moins apparentes (moins de 4 % de la population totale) que ce qui est suggéré ici du fait de l'utilisation de symboles excessifs. Reproduit avec l'autorisation de la British Library.

Figure 1.12. Exemple de carte à visée de propagande (publiée dans Gould et Bailly, 1995, p. 34)

Au cours de l'Histoire, la carte a été utilisée pour manipuler politiquement l'information qu'elle communiquait, au moyen de divers stratagèmes (Harley, 1988) :

- Distorsion délibérée du contenu par adaptation des projections, manipulation de l'échelle, agrandissement à l'excès ou déplacement des symboles ou de la topographie, utilisation de couleurs à fort pouvoir émotif (Figure 1.12) ;
- Censure ou représentation délibérément erronée pour soutenir un discours politique – ex : non révision des détails de peuplement, suppression ou déplacement de données militaires sensibles, déformation des frontières pour des revendications territoriales.

Le cartographe ne suit pas seulement des règles techniques pour produire la carte mais aussi des tendances culturelles, qui dépendent du contexte historique plus large dans lequel elles sont produites (Harley, 1992). Cette influence culturelle peut être ignorée des cartographes eux-mêmes, si bien qu'elles peuvent causer des distorsions inconscientes du contenu de la carte (Harley, 1988). On citera par exemple :

- des décisions géométriques telles que le lieu à placer au centre de la carte, la projection ;
- les silences des cartes : les informations omises peuvent être aussi importantes que celles communiquées (ex : ne pas publier les territoires des nations indiennes sur les anciennes cartes d'Amérique, gommer la dimension sociale des territoires si bien que les décisions prises dans l'exercice du pouvoir peuvent être déconnectées de l'humain) ;
- la classification des symboles de la légende, qui peuvent communiquer une notion de hiérarchie trompeuse (ex : signaler les villes par des icônes proportionnelles à leur rang, dans les cartes féodales les symboles des châteaux étaient parfois plus grands que les symboles des villages alors que leur surface au sol était moins grande).

Pour éviter que le message communiqué par la carte ne soit erroné, le cartographe doit donc être alerté sur les dangers relatifs à ce format et suivre, dans la mesure du possible, les règles de la cartographie. Il semble également utile d'informer le lecteur sur les limites de l'outil cartographique : « Quand [les cartographes] oublient la différence entre la carte et le paysage, et quand ils nous permettent et nous persuadent d'oublier cette différence, toutes sortes de responsabilités s'ensuivent » (Roszak, 1972, p. 410).

Les règles de construction de cartes ont été remises en question par le développement de l'informatique, qui a entraîné de nouveaux potentiels dans la production de cartes, a modifié ses usages et a rapproché la cartographie d'autres disciplines. Mais malgré ces profondes transformations, aucune véritable innovation n'a été réalisée dans la sémiologie graphique appliquée aux cartes, les règles anciennes demeurant une référence (Cauvin et al., 2008b; Jégou, 2007). La section suivante présente les nouveaux usages et les formalismes de ces nouvelles formes cartographiques.

1.2. De la carte statique à la géovisualisation

1.2.1. Introduction de la géovisualisation

A partir des années 80, les avancées dans les technologies de l'information et de la communication ont provoqué un développement fulgurant de la disponibilité des informations géographiques. Elles ont également introduit de nouveaux potentiels d'analyse, produisant ainsi un renouveau de la cartographie. Grâce à la mise à disposition des images satellitaires à large échelle, le perfectionnement des réseaux de capteurs et la diversification des producteurs et des sources d'information (données citoyennes, réseaux sociaux), les données géolocalisées n'ont jamais été aussi nombreuses ni aussi disponibles. On assiste à une massification des données géographiques, dans leur couverture spatiale et temporelle. Les capteurs en temps réels fournissent des informations à une granularité temporelle fine et en continu, générant rapidement de grandes quantités de données. Ainsi, les chercheurs estiment qu'entre 2005 et 2010, plus de données ont été générées que dans toute l'Histoire jusqu'à cette date (Keim et al., 2005).

En parallèle, des technologies ont été développées pour permettre d'explorer cette masse de données. Des disciplines émergentes ont fait leur apparition pour y répondre, telles que l'analyse exploratoire de données (Tukey, 1977) et la visualisation d'informations (Tufte, 1983). La cartographie a évolué dans le même temps, puisant dans ces disciplines connexes et échangeant des méthodes et des outils, pour traiter les nouvelles données volumineuses, hétérogènes et organisées dans l'espace et dans le temps. Cela a conduit au développement d'un nouveau domaine d'étude connexe à la cartographie : la *géovisualisation*.

La géovisualisation est définie comme « l'ensemble des méthodes et outils de visualisation permettant d'explorer, d'analyser et de synthétiser de façon interactive des données géolocalisées, en vue de construire de la connaissance » (Dykes et al., 2005). En géovisualisation, la carte est transformée et intégrée au sein d'un environnement visuel informatisé, orienté vers l'exploration de jeux de données complexes.

Une évolution fondamentale de la carte à l'intérieur d'un environnement de géovisualisation est liée à l'introduction de l'interactivité. L'interactivité peut être définie comme « un ensemble d'outils et de fonctionnalités, disponibles dans une interface, qui permettent à un utilisateur de communiquer avec un système informatique » (Zanin et al., 2013, p. 84). Les fonctions d'interaction permettent à l'utilisateur de dialoguer avec la carte, de se localiser et de naviguer dans l'espace et les données, d'accéder à de nouveaux contenus et de modifier l'apparence de la visualisation.

L'interactivité a introduit de nouvelles opportunités dans la production de la carte. Celle-ci devient non seulement interactive mais elle peut être *animée*, lorsqu'elle permet de visualiser un mouvement, *dynamique*, c'est-à-dire combiner interactivité et l'animation des données, *multimédia*, intégrant de données sous des formats variés (ex : texte, images, vidéos), et être liée en temps réel à la base de données qu'elle restitue.

Une autre caractéristique des environnements de géovisualisation, visant à faciliter l'exploration des données, est l'ajout de modules annexes à la carte, permettant d'interroger

les liens entre organisation spatiale, temporelle et description des phénomènes (Davoine, 2014), notamment en combinant des modes de représentation textuels, graphiques et cartographiques des données, répartis dans des fenêtres synchronisées (Figure 1.13). La combinaison de ces « vues parallèles » augmentent les potentialités de la carte et permet de pallier certaines limites des cartes traditionnelles.

Au sein de ces environnements « multi-vues », la carte renseigne sur la répartition spatiale des objets tandis que les vues non-spatiales (graphiques temporels ou attributaires, tableaux de données) replacent les données dans un contexte plus large (Takatsuka et Gahegan, 2002). Les vues graphiques associées à la carte permettent de mettre l'accent sur des dimensions de l'information peu valorisées dans les cartes traditionnelles.

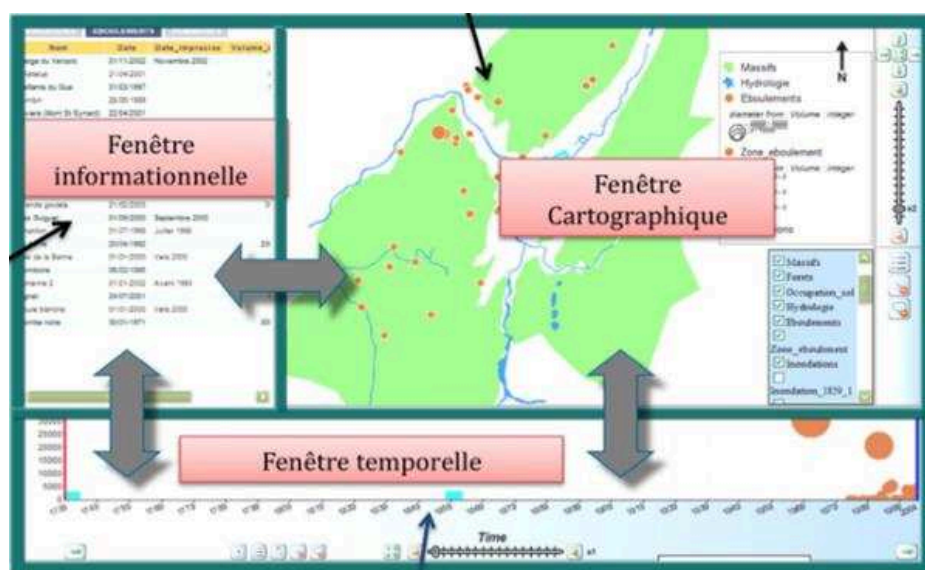


Figure 1.13. Interface de géovisualisation multi-vue (Source : outil GenGHIS) (Davoine et al., 2009)

Le développement d'une géovisualisation place l'utilisateur et ses besoins au centre de la production cartographique. Selon le public auquel elles s'adressent et l'usage auquel elles sont destinées, les interfaces de géovisualisation adoptent des formes et des méthodes d'interaction variées. La plus grande prise en compte de l'utilisateur et de ses usages en géovisualisation résulte de deux facteurs. D'une part, elle est la conséquence d'une réflexion de la science cartographique sur les apports de l'interactivité dans le contexte de la carte, ayant conduit à l'élaboration d'un modèle « carte-usage » (Maceachren et Kraak, 1997). D'autre part, elle suit l'évolution des technologies informatiques, notamment du web, et des attentes des utilisateurs. Ces deux aspects sont développés dans la section suivante.

1.2.2. Usages des géovisualisations

Grâce aux nombreuses fonctionnalités qu'ils introduisent, les environnements de géovisualisation assistent l'utilisateur dans ses activités. Les usages des géovisualisations ont été classifiés par MacEachren et Kraak (1997), qui les déclinent selon trois axes dans un

« cube des usages » (« *map-use cube* ») (Figure 1.14). Les cartes intégrées dans des environnements de géovisualisation diffèrent par :

- le niveau de connaissance préalable sur les données visualisées (de connu à inconnu),
- le public visé (du grand public aux experts) et
- le niveau d'interaction (de faible à élevé).

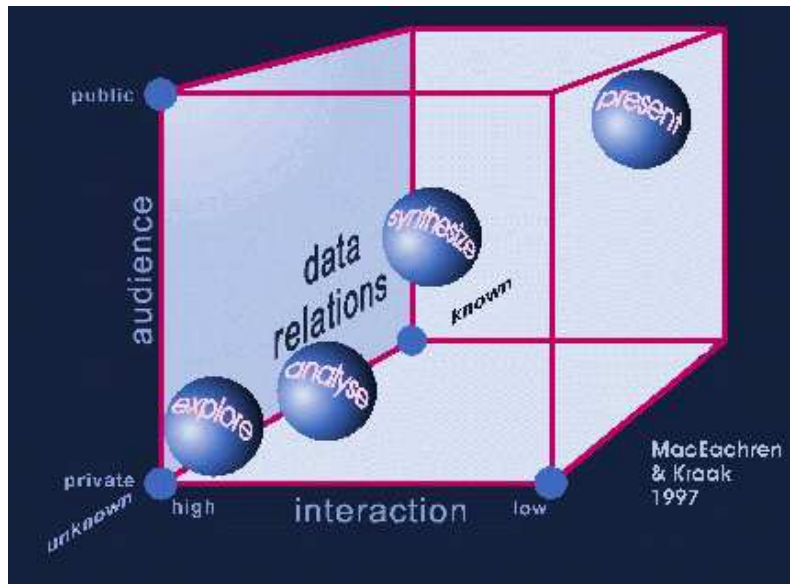


Figure 1.14. Cube des usages des géovisualisations (Maceachren et Kraak, 1997)

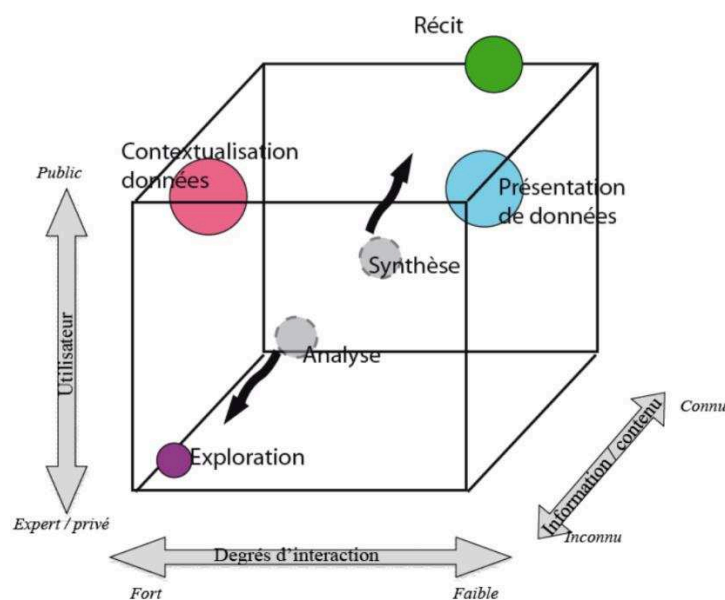


Figure 1.15. Révision du cube des usages des géovisualisations sur la base des outils cartographiques en ligne sur internet (Davoine et al., 2015)

Les usages sont répartis selon une diagonale de ce cube. A une extrémité se trouvent les visualisations qui ont un objectif de *présentation* de données déjà connues, qui sont à destination du grand public et qui possèdent un faible niveau d'interactivité. En se déplaçant

vers l'extrémité opposée du cube, les niveaux suivants regroupent les visualisations à objectif de *synthèse*, puis d'*analyse* d'information, qui correspondent d'avantage à des usages d'expertise nécessitant un peu plus d'interactions, par exemple pour identifier des motifs dans les données ou des relations moins connus. Enfin, dans le coin opposé du cube se trouve l'objectif d'*exploration* de données, qui correspond au niveau d'interaction le plus élevé, à destination d'experts, pour révéler des informations inconnues.

Sur la base d'un corpus de géovisualisations en ligne sur internet, Davoine et al. (2015) ont proposé une évolution de ce cube (Figure 1.15). Ces auteurs identifient deux nouveaux types de géovisualisation s'étant développés dans les dernières années :

- les cartes de récit, qui délivrent une information totalement connue et grand public, avec une interactivité moyenne à faible,
- les cartes de contextualisation de données, qui visent à présenter l'information dans un contexte plus large, en proposant à l'utilisateur de la co-visualiser et de la combiner avec de nombreuses autres données susceptibles de l'enrichir.

Par ailleurs, ils observent une polarisation des géovisualisations entre celles à destination du grand public et celles à destination des experts, qui s'accompagne d'une relative disparition des usages intermédiaires d'analyse et de synthèse. Pour eux, cela met en évidence une cartographie en ligne plus centrée sur la diffusion de la donnée brute elle-même que sur l'information et les phénomènes analysés qu'elle traduit.

Pour expliquer ce changement de pratique, les mêmes auteurs soulignent la transformation des paradigmes de conception des environnements cartographiques et le souhait de transparence vis-à-vis des utilisateurs (Kaddouri et al., 2014, p. 43). Bien que cette révision du cube ne concerne que les géovisualisations diffusées sur internet (qui restent une catégorie spécifique parmi les géovisualisations existantes), cette tendance peut se retrouver dans tous les types de géovisualisation. Elle reflète finalement l'évolution des usages de l'information qui ont accompagné le Web 2.0 et le développement du Géoweb.

L'expression « Web 2.0 » désigne la transformation des fonctionnalités et des usages du web, intervenue au début des années 2000. Elle se caractérise par plus de simplicité et d'interactivité, en particulier dans les interfaces et les échanges, permettant aux internautes ayant peu de connaissances techniques de s'approprier de nouvelles fonctionnalités du web (Wikipedia, 2016g). En simplifiant l'accès aux informations, le Web 2.0 a permis aux utilisateurs de passer d'un statut de spectateur à celui d'acteur, qui alimente les sites en contenu et maîtrise sa navigation. En parallèle, le nombre de données géoréférencées a connu une augmentation exponentielle, donnant naissance au Géoweb.

Le Geoweb désigne « une organisation par l'espace de l'information sur Internet, à travers un référencement direct ou indirect sur la surface terrestre » (Joliveau, 2010). Une grande quantité d'informations circulant sur Internet est aujourd'hui géoréférencée, de façon volontaire ou non (dans ce dernier cas, par exemple via l'adresse IP de l'ordinateur, le GPS du téléphone portable accédant à internet, etc.). Parallèlement, des outils et services dédiés ont

été développés, dont la dynamique a notamment été lancée par l'application cartographique de Google⁸, permettant à des utilisateurs potentiellement novices de produire et diffuser leurs propres cartes. Ce contexte a conduit à la démocratisation des cartes et des données géographiques.

Globalement, les utilisateurs souhaitent d'avantage avoir un rôle dans la construction du contenu qu'on leur propose sur Internet et cela semble s'appliquer également aux environnements de géovisualisation. Pour y répondre, les cartographes développent des méthodes associées au concept de « carte sur demande » (Zanin et al., 2013, p. 83) : ainsi « les cartes peuvent être produites pour se conformer aux besoins et aux souhaits des utilisateurs ou peuvent être adaptées pour correspondre à leurs représentations mentales » (*ibid*).

Les environnements de géovisualisation sont cependant complexes et leur adaptation aux utilisateurs n'est pas une question triviale. Cette adaptation peut notamment s'appuyer sur le choix de fonctions interactives et de modes de visualisation de données appropriés. Les méthodes interactives d'exploration ont été très étudiées dans d'autres disciplines s'attachant à la visualisation de données.

Pour faire face au foisonnement des types de données et de leurs objectifs d'exploration, la géovisualisation et les autres disciplines de visualisation de données ont plutôt fait l'objet d'évolutions et de développements méthodologiques séparés. Or la géovisualisation peut s'enrichir de certains développements de ces autres disciplines, qui sont abordés dans la section suivante.

1.2.3. L'apport d'autres disciplines de visualisation de données

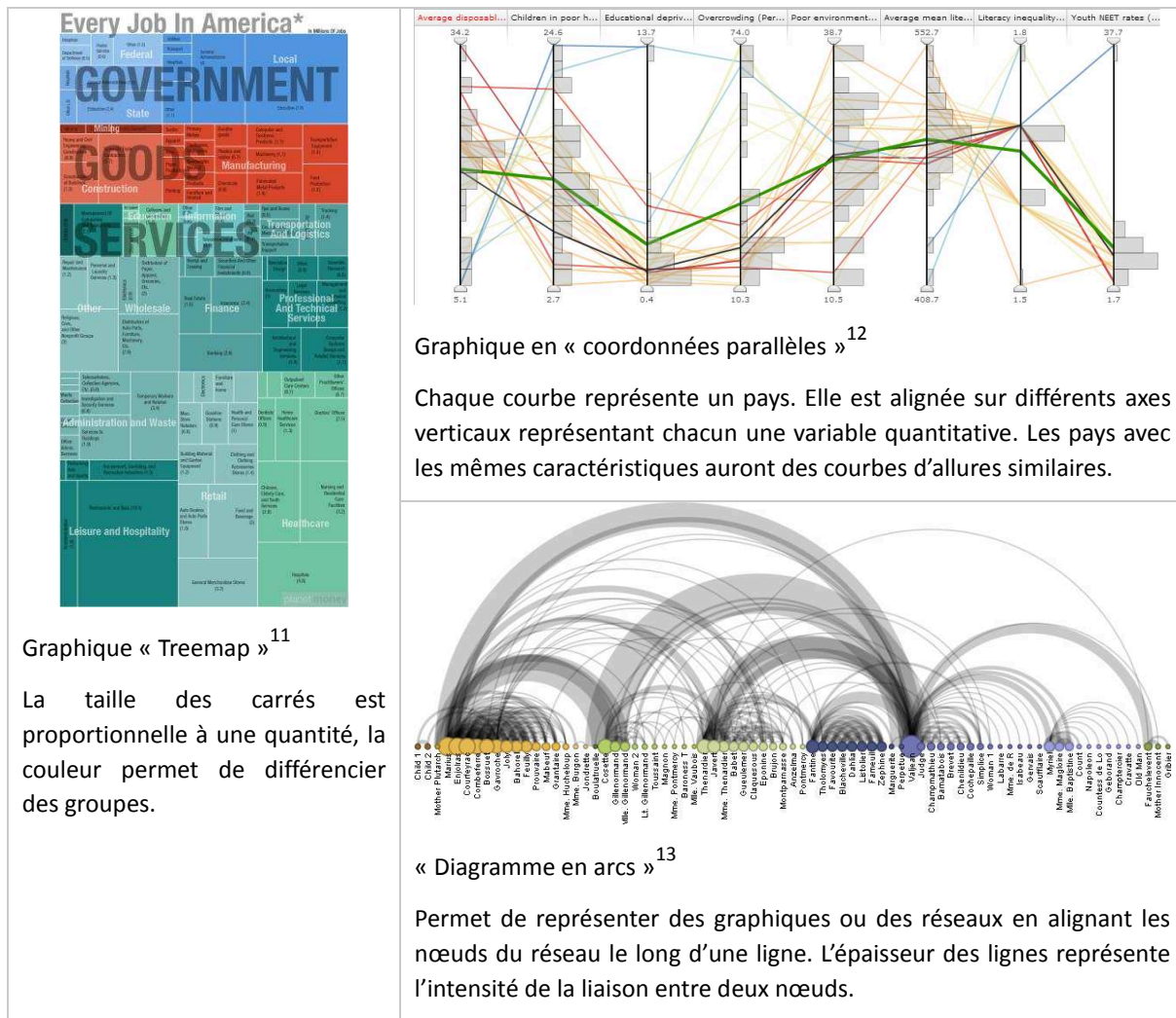
Une « visualisation de données » désigne une représentation graphique « virtuelle » de ces données (Wikipedia, 2016e). Plusieurs disciplines, apparues depuis les années 1990, s'intéressent à la visualisation graphique d'informations. Elles diffèrent principalement par les données auxquelles elles s'intéressent et par leurs approches. Parmi elles, on peut citer la *SciVis*, l'*InfoVis* et la *Visual Analytics*, dont les représentations graphiques et les méthodes peuvent alimenter le contenu et l'interactivité des interfaces de géovisualisation.

La *SciVis* s'attache à illustrer graphiquement des données scientifiques, pour permettre aux experts de comprendre ou d'avoir un nouveau regard sur leurs données (Wikipedia, 2015b). La forme de la visualisation est guidée par la forme des objets réels étudiés (ex : visualisation cartographique de l'espace, dessin 3D des os du crâne, maquette d'architecture, etc.). En *InfoVis*, en revanche, la représentation graphique n'est pas imposée par les données mais choisie par le designer (Munzner, 2008). L'*Infovis* s'attache notamment à visualiser des séries statistiques ou temporelles. La *Visual Analytics* se spécialise dans des interfaces visuelles à haut niveau d'interactivité (G. Andrienko et Chen, 2015) en particulier pour l'analyse des

⁸ Google Maps©, source : <http://www.google.fr/maps>, consulté le 17/01/2017

grandes masses de données (big data).

Ces disciplines élaborent des méthodes graphiques orientées tantôt vers la visualisation de la dimension temporelle, attributaire ou même spatiale des données. Les méthodes de visualisations mises en œuvre sont très variées et nous ne les citerons pas toutes. Les sites datavis.ca⁹ et [d3.js](https://github.com/d3/d3/wiki/Gallery)¹⁰ proposent notamment des inventaires fournis, parmi lesquels on peut trouver les graphiques en coordonnées parallèles, les *treemaps*, les *small multiples*, les *theme rivers*,... (Figure 1.16).



Graphique « Treemap »¹¹

La taille des carrés est proportionnelle à une quantité, la couleur permet de différencier des groupes.

Graphique en « coordonnées parallèles »¹²

Chaque courbe représente un pays. Elle est alignée sur différents axes verticaux représentant chacun une variable quantitative. Les pays avec les mêmes caractéristiques auront des courbes d'allures similaires.

« Diagramme en arcs »¹³

Permet de représenter des graphiques ou des réseaux en alignant les nœuds du réseau le long d'une ligne. L'épaisseur des lignes représente l'intensité de la liaison entre deux nœuds.

Figure 1.16. Quelques exemples de visualisation de données (Datavis)

Le pouvoir des visualisations d'information est de fournir « une aide externe qui augmente

⁹ Source : <http://www.datavis.ca/index.php>

¹⁰ Source : <https://github.com/d3/d3/wiki/Gallery>

¹¹ Source : <http://www.npr.org/blogs/money/2014/01/09/261053608/every-job-in-america-in-1-graph>

¹² Source : <http://stats.oecd.org/childwellbeing/>

¹³ Source : <http://mbostock.github.io/protovis/ex/arc.html>

les capacités humaines » (Norman, 1993, p. 43). Dans cet objectif, l'implémentation de fonctions interactives joue un grand rôle. Il a été démontré que les visualisations interactives soutiennent mieux la recherche et la compréhension de motifs et d'anomalies dans les données que les visualisations statiques (Cleveland et McGill, 1988). De ce fait, de nombreux travaux se sont attachés à explorer les méthodes interactives susceptibles de faciliter l'analyse et le raisonnement des utilisateurs.

Selon Schneiderman (1996), pour être efficace, une visualisation doit permettre à l'utilisateur d'explorer les données selon le schéma suivant : « voir l'ensemble, zoomer et filtrer, puis détailler sur demande » (« *overview, zoom and filter, then details-on-demand* »). Schneiderman nomme ce principe le « mantra de recherche visuelle », en ce qu'il devrait être répété et appliqué dans chaque outil de visualisation.

Développé sous forme littérale, ce schéma signifie qu'un bon outil de géovisualisation devrait d'abord donner à voir l'ensemble des données et fournir des outils à l'utilisateur pour y naviguer (zoom) et écarter les données qui n'intéressent pas son analyse (filtre). Seulement après ces premières étapes, l'utilisateur pourra avoir envie d'en savoir plus et des fonctionnalités devraient lui permettre d'accéder à plus d'informations s'il en ressent le besoin. Schneiderman ajoute ensuite au mantra, en tant que principes subsidiaires : « voir les relations, voir l'historique [des interactions] et extraire [les données] ».

Un intérêt majeur des outils de visualisation interactifs pour les utilisateurs est de pouvoir transformer la vue sous l'effet de l'interaction de l'utilisateur. Les transformations de vue ont notamment été décrites par Card et al. (1999) dans le domaine de l'InfoVis. Elles permettent de modifier la structure visuelle et d'accéder à plus d'informations sur les données qu'une visualisation figée. Ces auteurs listent trois transformations de vue possibles (Card et al., 1999) :

- Le sondage de localisation : il consiste à interagir avec une zone spécifique de la vue graphique pour montrer des données supplémentaires. Ce procédé est par exemple utilisé lors de la sélection d'un point sur une carte, qui affiche une fenêtre pop-up contenant plus d'informations, ou bien lors du survol d'un point sur un graphique en réseau, qui met en surbrillance tous les points qui lui sont reliés (McDonald, 1990).
- Le contrôle de point de vue : il consiste à appliquer des transformations affines à la vue affichée qui modifient ses proportions. Il recouvre des fonctions comme le déplacement dans la vue (*pan*) et le zoom. Une technique connue appartenant à cette catégorie est l'« *overview + detail* » (Schneiderman, 1996) : elle consiste à combiner, sur le même écran, une vue graphique globale de l'information et une seconde vue détaillée qui montre plus de détails sur une zone restreinte du graphique (Figure 1.17a). Dans une carte géographique, l'association d'un carton de localisation à la carte peut se rapprocher de cette technique.
- La distorsion : elle consiste à déformer l'affichage pour mettre l'accent sur une ou plusieurs zones particulières du graphique, tout en diminuant l'espace occupé par le reste. Il s'agit d'un synonyme de la technique du « *focus + context* » (Figure 1.17b). Un exemple parfois employé en cartographie est l'effet loupe, ou *fisheye* (Sarkar et

al., 2013).

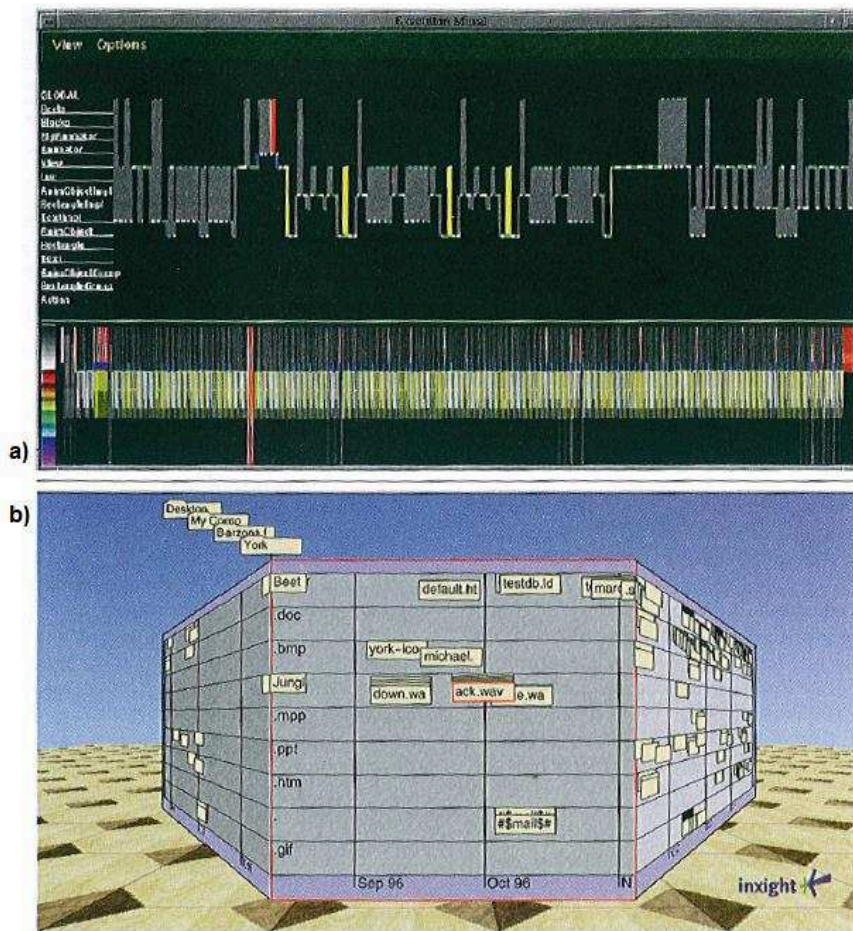


Figure 1.17. a) Un exemple de méthode overview+zoom : l'application *Information Mural* (Jerding et Stasko, 1995) où le fragment de frise montré en haut de l'écran est localisé dans l'ensemble de la frise du bas par un rectangle rouge. – b) Un exemple de focus+context : le mur en perspective (Mackinlay et al., 1991) où la face avant du mur montre le détail d'une partie du graphique, tandis que les faces fuyant vers l'arrière permettent d'apercevoir le contexte.

Une quatrième méthode communément utilisée est le *linking and brushing* (qu'on peut traduire par « lier et appliquer ») : lorsque plusieurs vues concernant un même jeu de données coexistent dans l'interface, un changement dans l'une des vues produit par l'interaction d'un utilisateur (sélection, filtre,...) est automatiquement reproduit dans les autres vues (Keim, 2002) (ex : Figure 1.18).

Ces méthodes de visualisation et d'interaction peuvent s'intégrer à l'environnement de géovisualisation, comme l'illustre la Figure 1.18. Grâce à la mise en valeur de points de vue complémentaires sur l'information, elles permettent d'enrichir l'analyse des données, tout en aidant l'utilisateur à naviguer dans de plus grandes masses de données.

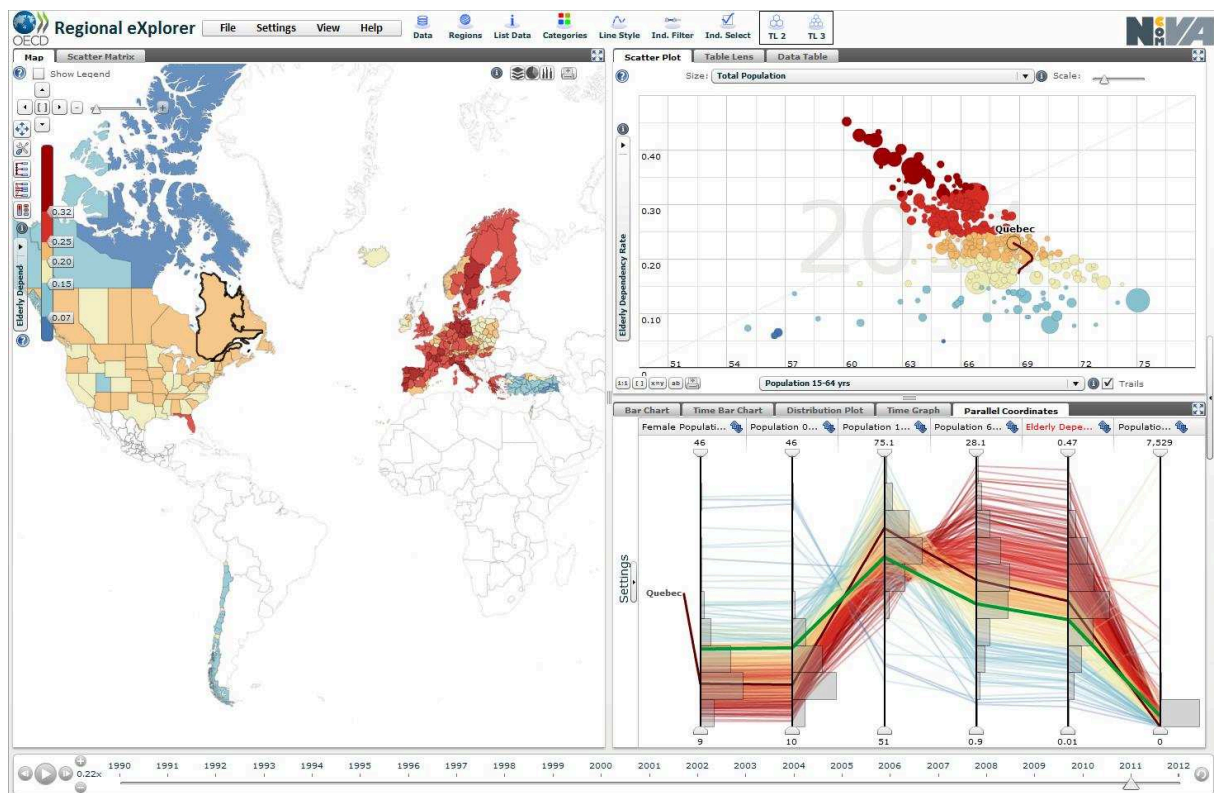


Figure 1.18. Vues graphiques coordonnées à la carte dans l'application OECD Regional Explorer¹⁴

Dans un environnement de géovisualisation, la carte peut sembler un module parmi d'autres. Elle constitue cependant le cœur de l'environnement de géovisualisation, autour duquel les autres vues parallèles s'organisent. L'importance accordée à la carte dans ces environnements peut s'expliquer de deux façons. Tout d'abord, les environnements de géovisualisation sont développés par des cartographes, qui attachent traditionnellement plus d'importance à la carte. Mais on peut également avancer que la carte porte une dimension « concrète » sur les données qui n'est pas forcément incluse dans les autres graphiques. En effet, les données rapportées dans les applications de géovisualisation représentent des objets concrètement localisables à la surface de la Terre. L'espace, expérimenté et parcourable par tous, peut donc constituer un point d'entrée principal logique pour appréhender les objets étudiés.

1.2.4. Le cas de la visualisation d'entités superposés

Les méthodes d'interaction peuvent permettre de résoudre certaines problématiques relatives à l'exploration de grandes quantités de données. C'est notamment le cas pour gérer la superposition visuelle d'entités dans la carte, problématique à laquelle nous sommes confrontée dans notre cas d'étude des inondations historiques.

¹⁴ Source : <http://stats.oecd.org/OECDregionalstatistics/#story=0>

Il existe deux grandes catégories de méthodes pour gérer la superposition cartographique d'entités ponctuelles :

- La première catégorie consiste à agréger les points qui sont trop proches spatialement à l'échelle de la carte. Par exemple, la librairie « Marker Clusterer », pour Google Maps¹⁵, agrège les points proches automatiquement selon le niveau de zoom et affiche le nombre de points qui ont été fusionnés à chaque localisation (Figure 1.19.a).
- La seconde catégorie de méthodes consiste à déplacer les points de leur localisation initiale, de façon à remplir l'espace graphique plus efficacement. Par exemple, la librairie « Spiderfier » pour Leaflet¹⁶ montre d'abord l'ensemble des points superposés et, au clic de l'utilisateur, les disperse autour de leur localisation initiale en forme de spirale (Figure 1.19.b). Un autre exemple qui présente l'avantage d'intégrer la dimension temporelle, consiste à décaler les symboles par rapport à leur localisation initiale selon un axe vertical et de les ordonner dans l'ordre chronologique. C'est le cas de la carte ancienne présentée sur la Figure 1.20.

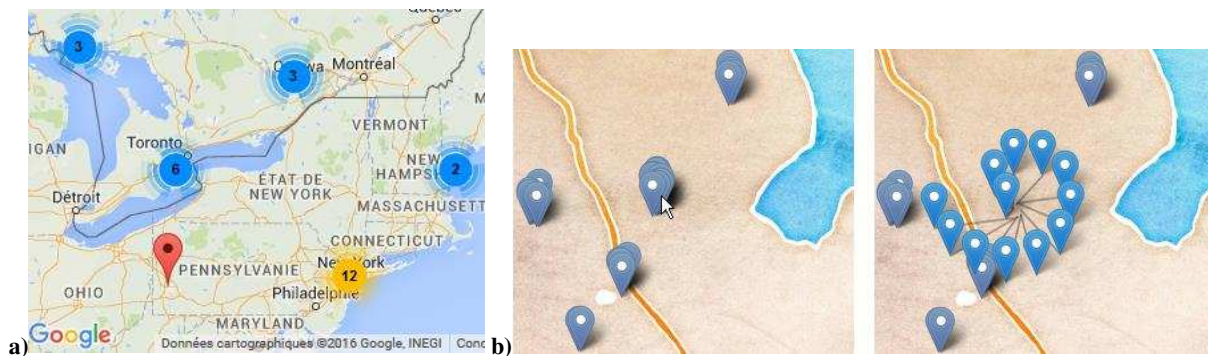


Figure 1.19. a. Exemple de méthode agrégeant les points proches (Marker Clusterer). – b. Exemple de méthode de déplacement relatif des points proches (Spiderfier).

15 Demo: http://google-maps-utility-library-v3.googlecode.com/svn/tags/markerclusterer/1.0/examples/simple_example.html

16 Demo: <https://github.com/jawj/OverlappingMarkerSpiderfier-Leaflet>

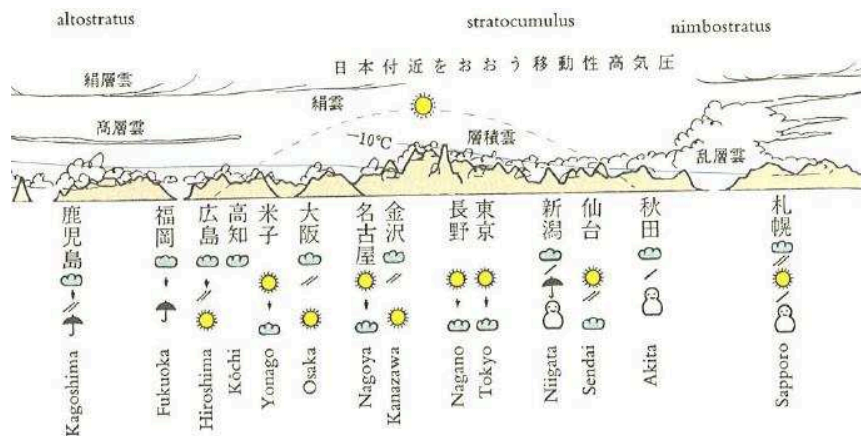


Figure 1.20. Extrait d'une carte météo sur le Japon. Le changement de conditions météo au cours de la journée est indiqué par des symboles iconiques, qui sont ordonnés chronologiquement de haut en bas (Tufté 1990).

1.3. Synthèse

Dans cette section, nous avons vu que la représentation cartographique utilise un langage propre pour communiquer un message. Pour que ce message soit intelligible pour le lecteur, le cartographe doit suivre un certain nombre de règles méthodologiques propres à la construction de la carte et fournir des clés de lecture pour codifier la symbologie utilisée. Le suivi de ces règles est une condition nécessaire mais non suffisante pour produire une carte utile au lecteur. Le cartographe doit aussi anticiper l'effet que la carte aura sur le lecteur et sélectionner le contenu adapté à ses besoins.

En s'appuyant sur l'interactivité, les cartes dynamiques et les environnements de géovisualisation permettent de traiter des jeux de données plus complexes et de mettre en relation les différentes dimensions de l'information : spatiale, temporelle et attributive. L'interactivité permet aux utilisateurs d'être acteurs de leur navigation et d'adapter la visualisation à leurs objectifs et leurs besoins. L'environnement de géovisualisation constitue alors non seulement un outil de communication mais devient « une partie du processus de réflexion/connaissance » à part entière (MacEachren, cité par Caquard, 1998).

Selon Slocum et al. (2001), pour être utilisables, les méthodes de géovisualisation doivent prendre en considération les différences entre individus ou entre groupes. Comme caractéristiques susceptibles d'influencer l'usage des outils de géovisualisation, ces auteurs listent (Slocum et al., 2001) : le niveau d'expertise de l'utilisateur (expériences, connaissances et savoirs antérieurs), sa culture (la façon de structurer le langage, l'interprétation des symboles), son genre, son âge et l'existence d'un handicap sensoriel.

S'adapter à l'utilisateur signifie aussi intégrer ses objectifs et ses usages dans la démarche de production d'un outil de géovisualisation. La place et le rôle de la carte au sein de ses tâches et objectifs nous semble notamment être un facteur déterminant, qui influence la façon dont l'environnement cartographique devra être construit.

Dans notre cas d'étude, le domaine d'application de la carte est celui des risques naturels. La section suivante décrit le champ thématique des risques naturels, les spécificités de ses données qui peuvent influencer l'utilisabilité de l'information par les utilisateurs, et la façon dont les cartes sont utilisées et étudiées dans ce domaine.

2. Utilisation des cartes dans le champ des risques naturels

Les outils cartographiques sont devenus des supports incontournables des documents réglementaires de la gestion des risques, notamment par leur capacité à définir le risque en déterminant des périmètres tels que les zones inondables ou les zones de danger (Le Bourhis, 2007; Martinais, 2007). Les cartes sont également pertinentes pour agir face aux risques, en particulier selon trois axes : mettre en place des actions de prévention pour réduire les conséquences d'un événement probable, des actions de prévision visant à anticiper l'apparition d'un phénomène dangereux et des actions de gestion de crise visant à préparer des moyens pour faire face à l'événement lorsqu'il survient (Chesneau, 2006; P.-A. Davoine, 2014). Nous définissons dans un premier temps le risque et ses composantes, avant de nous intéresser à sa cartographie et aux usages de cette information.

2.1. Introduction à l'étude des risques naturels

Etudier les risques a pour finalité de réduire les dommages qu'ils occasionnent. En France, la politique de réduction des risques naturels, dite de « prévention des risques » agit selon sept axes (PRIM, 2009a) :

- connaître les phénomènes à risque pour comprendre comment il est possible de s'en prémunir,
- surveiller, pour prévoir la survenue des phénomènes à risque,
- informer les populations pour les préparer à adopter les bons comportements qui garantissent leur sécurité,
- anticiper l'aménagement du territoire pour ne pas construire en zone à risque ou ne pas amplifier les impacts des phénomènes par des aménagements inappropriés,
- protéger les biens pour diminuer les dommages qu'ils peuvent subir,
- planifier l'organisation des secours pour assurer une réaction plus efficace en cas de crise,
- prendre en compte les retours d'expérience sur les événements passés pour en tirer des enseignements et notamment améliorer les actions des agents concernés et les réglementations.

La gestion et la prévention des risques peuvent s'appuyer sur plusieurs théorisations des concepts afférents aux risques, qui permettent de mieux cerner en quoi un risque consiste.

2.1.1. Les composantes du risque naturel

Les définitions du risque sont multiples (Arnaud, 2009, p. 37). En géographie, la plus largement admise est :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité}, \quad \text{où } \text{Vulnérabilité} = f(\text{Enjeux})$$

(la définition de f variant selon les auteurs)

L'*aléa* est défini comme la « manifestation d'un phénomène, naturel ou anthropique, [avec une] occurrence et [une] intensité données » (PRIM, 2009b). Exprimé en d'autres termes, le concept d'*aléa* naturel désigne la probabilité qu'un phénomène naturel dangereux se déclare sur un territoire, avec une certaine intensité et dans une certaine période de temps.

L'*aléa* ne devient un risque que s'il vient perturber des enjeux présents sur le territoire. L'*enjeu* désigne l'« ensemble des personnes et des biens (ayant une valeur monétaire ou non monétaire) pouvant être affecté par un phénomène naturel » (PRIM, 2009b). Les enjeux soumis au risque, qui peuvent être humains, matériels ou environnementaux, sont porteurs d'une *vulnérabilité*, qui décrit « le niveau de conséquences prévisibles de l'*aléa* sur les enjeux » (PRIM, 2009b). Des équations plus récentes du risque viennent intégrer la notion de *résilience*, en tant que la capacité d'un système à se réorganiser pour s'adapter à des *aléas* qui le menacent (Provitolo, 2012). Lorsque la *résilience* augmente, le risque diminue.

La concrétisation de l'*aléa* sur le territoire est dénommée *événement naturel* ou, dans un sens plus large, *événement issu de risque* (Arnaud, 2009, p. 95). Ce dernier terme peut également désigner les dommages engendrés par l'événement naturel. L'étude des dommages dus aux risques est complexifiée par le fait qu'un *aléa* peut être constitué de plusieurs phénomènes naturels, qui vont menacer des objets différents : par exemple, l'*aléa* volcanique résulte de la combinaison d'un *aléa* coulée de lave, un *aléa* projection de cendres, un *aléa* de fissuration du sol, etc. (Davoine et al., 2012).

Les cartes destinées à l'étude des risques vont présenter tout ou partie des composantes du risque : les objets ou lieux sources d'*aléa*, la distribution spatiale des enjeux, le niveau de risque global et/ou les événements issus de risques. Le contenu de la carte dépendra de l'usage qui en est attendu. Selon Palka (2015), ces composantes ne sont pas considérées de la même façon par des acteurs différents : les scientifiques vont tenter de quantifier l'*aléa* en produisant des modèles mathématiques de risque, les décideurs locaux vont aborder le risque sous l'angle de sa gestion pour tenter de limiter les impacts des phénomènes naturels sur le territoire, tandis que la population va l'aborder selon une approche personnelle et va s'intéresser à l'impact sur son lieu de vie (Palka, 2015; Rejeski, 1993).

2.1.2. Axiomes de la cindynique et influence en cartographie

La cindynique est la « science du danger » (Wikipedia, 2016b). Développée dans le cadre des risques industriels, le terme tend à s'étendre à toutes les sciences qui étudient les risques. La

cinématique propose sept axiomes qui définissent les risques et la façon dont ils sont perçus par les acteurs (Fleurbaey, 2003; Kervyn et Boulenger, 2007) :

- L'axiome de relativité : la perception et l'estimation du danger par les acteurs dépendent de la situation dans laquelle ils perçoivent ce danger, notamment du nombre d'espaces concernés, de la différence entre l'espace menacé et celui dans lequel les acteurs se positionnent et des horizons chronologiques du danger.
- L'axiome de conventionalité : les mesures du risque (niveau et probabilité) sont une convention négociée par les acteurs, entre les experts et les parties prenantes.
- L'axiome de téléologie : les acteurs soumis au danger ont chacun des missions et des questionnements différents, souvent contradictoires.
- L'axiome d'ambiguïté : le danger est perçu différemment par chaque individu, selon ses connaissances, ses croyances, son positionnement social, ses valeurs, ses missions, etc.
- L'axiome de transformation : les incidents, accidents et catastrophes sont des symptômes révélateurs des ambiguïtés. Le retour d'expérience permet de réduire ces ambiguïtés en transformant le système.
- L'axiome de crise : la crise est une désorganisation du réseau d'acteurs.
- L'axiome d'ago-antagonicité : toute intervention ou interaction avec le système conduit à deux effets opposés : une composante réductrice du danger et une composante créatrice de danger.

Ces axiomes peuvent apporter des éléments pour comprendre la façon dont les cartes de risques peuvent être perçues et utilisées.

Les utilisateurs de cartes de risques ne sont pas un public homogène : ils peuvent être eux-mêmes menacés, être chargés de gérer les menaces ou simple observateur extérieur. L'axiome de relativité nous permet de supposer que l'utilité perçue et la motivation pour utiliser une carte de risque naturel dépendra de la distance, spatiale et temporelle, entre l'utilisateur et l'événement de risque. Il nous dit aussi qu'un même acteur n'aura probablement pas les mêmes besoins selon la situation. Il n'y a donc sans doute pas une carte optimale pour chaque acteur, mais un ensemble de cartes dont la plus adaptée dépendra du contexte.

L'axiome de téléologie nous permet de renforcer le postulat que, si les acteurs confrontés au risque ont des objectifs et des besoins contradictoires, une carte de risque intégrant un certain jeu de données ne pourra pas convenir à tous les usages. Des cartes spécifiques devront donc être produites pour répondre aux besoins de ces différents acteurs.

L'axiome d'ambiguïté nous interpelle sur les différences propres à chaque individu. A l'intérieur d'un groupe homogène d'acteurs, chacun aura une lecture légèrement différente d'une carte de risque et il faut prendre en compte cet aspect pour contrôler au mieux le message transmis par la carte.

Enfin, l'axiome d'ago-antagonicité peut alerter sur le fait que si une carte de risque aide à la compréhension de certains aspects de l'aléa ou des enjeux, elle risque aussi d'en

occulter d'autres et donc de créer, sans le vouloir, un danger.

Il semble important que le cartographe adapte les cartes de risques produites en tenant compte de ces aspects, afin de fournir une information la plus adaptée aux utilisateurs selon leur profil.

Il existe en fait plusieurs types de cartes de risques, qui donnent à voir des dimensions différentes du risque et des événements, et qui s'adressent à des publics distincts. Une question qui peut se poser est de savoir si les axiomes précédemment décrits s'adapteront de la même façon selon le type de carte de risque considéré. La diversité des cartes de risques est présentée dans la section suivante.

2.2. Les cartes de risques

Il existe plusieurs types de carte qui visent à communiquer les risques. En nous inspirant de travaux antérieurs sur les cartes de risques (Arnaud, 2009; Chesneau, 2006; Palka, 2015), nous proposons de décliner cette typologie selon trois dimensions :

- le contenu des cartes,
- leurs échelles,
- leurs usages.

Ces trois dimensions ne sont pas indépendantes : l'usage de la carte a une influence sur le contenu et l'échelle qui sont les plus adaptés. A titre d'exemple, un élu local souhaitant s'informer sur les risques dans le cadre de sa fonction choisira probablement une carte à l'échelle de son territoire de juridiction qui montre le niveau global de l'ensemble des risques existants et les enjeux menacés. En revanche, un habitant, qui souhaite savoir si son habitation est en zone inondable, préférera sans doute une carte à grande échelle, centrée sur son habitation, qui montre la hauteur d'eau maximale qui peut l'impacter (Palka, 2015).

Ces trois dimensions de la carte de risques permettent d'établir des familles de cartes qui seront adaptées à différents contextes. Nous nous concentrerons ici sur l'exemple des cartes d'inondations.

2.2.1. *Le contenu des cartes de risques*

Arnaud a proposé une typologie des cartes de risques en fonction des données représentées par la carte (Arnaud, 2009) :

- Les cartes de « niveau » de risque, d'aléa, de vulnérabilité ou d'enjeu. Ces cartes mettent en valeur des zones équipotentielles de risque ou d'un composant du risque. C'est par exemple le cas des cartes de niveau d'aléa et d'enjeux des Plans de Prévention des Risques (PPR). Elles peuvent communiquer le résultat de calculs et de modélisations multicritères (croisant par exemple aléas et vulnérabilités). Un exemple est présenté sur la Figure 1.21. Certains auteurs ajoutent à cette typologie les cartes

dites « de dommages » qui montrent une évaluation économique des dommages moyens annuels (en €/an ou €/m²) en parallèle de l'aléa ou du risque (EXCIMAP, 2007; Merz et al., 2007; V. Meyer et al., 2012).

- Les cartes de réglementation. Ces cartes sont des traductions des cartes de risque ou d'aléa, destinées à transmettre des informations réglementaires relatives aux risques. Par exemple, on peut citer les cartes du PPR qui distinguent les zones constructibles ou non constructibles. Un exemple est présenté sur la Figure 1.22.
- Les cartes d'événements. Ces cartes localisent l'emplacement ou l'extension de phénomènes naturels identifiés, passés ou anticipés par simulation (ex : Figure 1.23 et Figure 1.24).

Cartes de niveau de risque et de réglementation

Les *cartes de niveau de risque* et les *cartes de réglementation* montrent généralement les zones soumises à différents degrés de risque, sous la forme d'aplats colorés. Elles exposent fréquemment une information assez complexe. Par exemple, la carte de la Figure 1.21 quantifie différents types d'aléas inondation (aléa débordement de cours d'eau, ruissellement et submersion marine), ce qui peut être difficile à comprendre pour un public non averti. La Figure 1.22 présente des zones soumises à des réglementations différentes (R1, R2, R3, B1, B2), qui sont peu exploitables sans connaissances préalables de leur signification.

Des informations contextuelles décrivant le territoire apparaissent souvent dans les cartes de niveau de risques. Elles permettent souvent de localiser l'aléa ou le risque dans l'espace (grâce aux noms de lieux, routes,...) ou de confronter l'aléa aux enjeux (bâtiments, infrastructures sensibles telles que les hôpitaux, occupation du sol ou photographie aérienne,...).

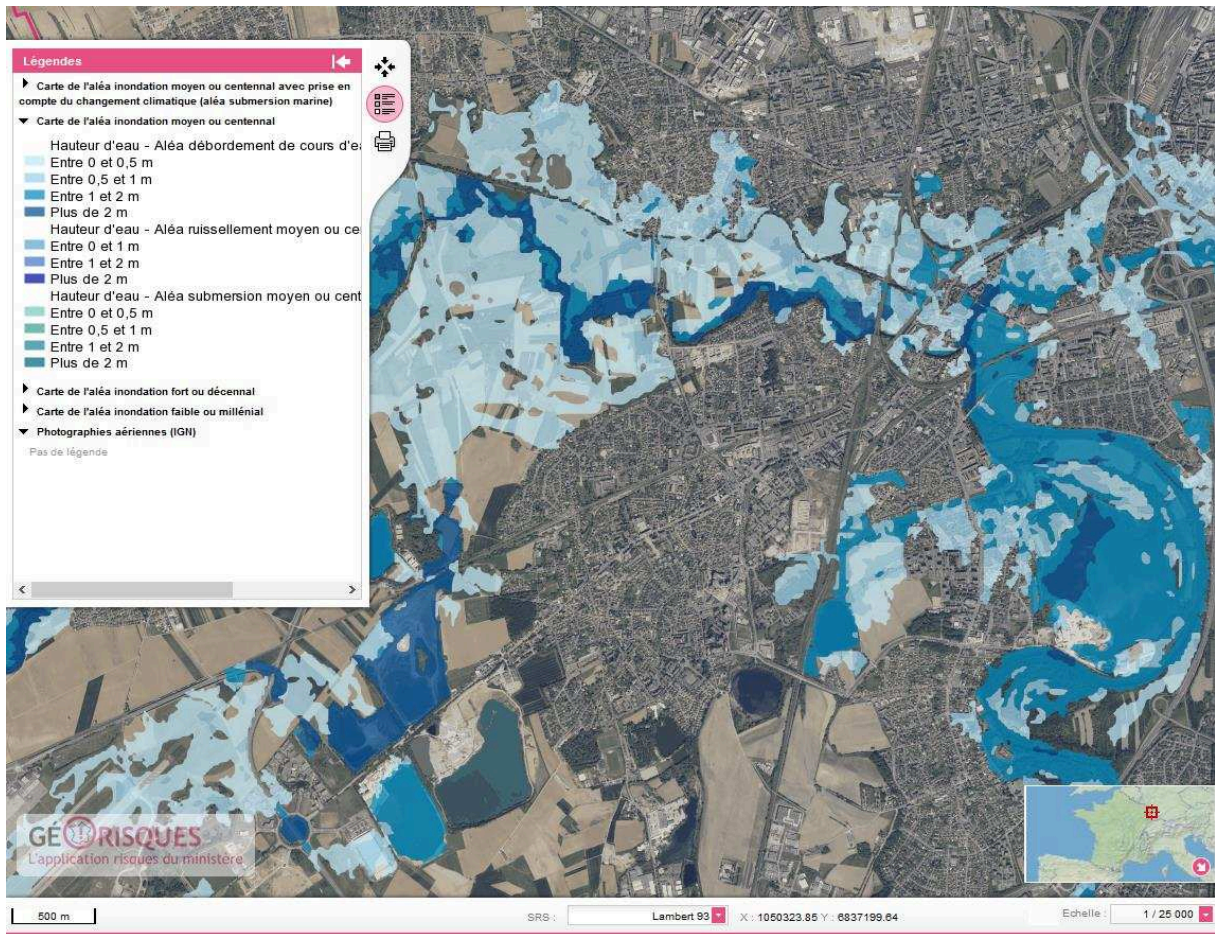


Figure 1.21. Carte de niveau d'aléas inondation à l'échelle de la ville de Strasbourg, issue du zonage des TRI (Territoires à Risque d'Inondation) (Source : portail Géorisques¹⁷)

¹⁷ <http://www.georisques.gouv.fr>, consulté le 16/08/2016

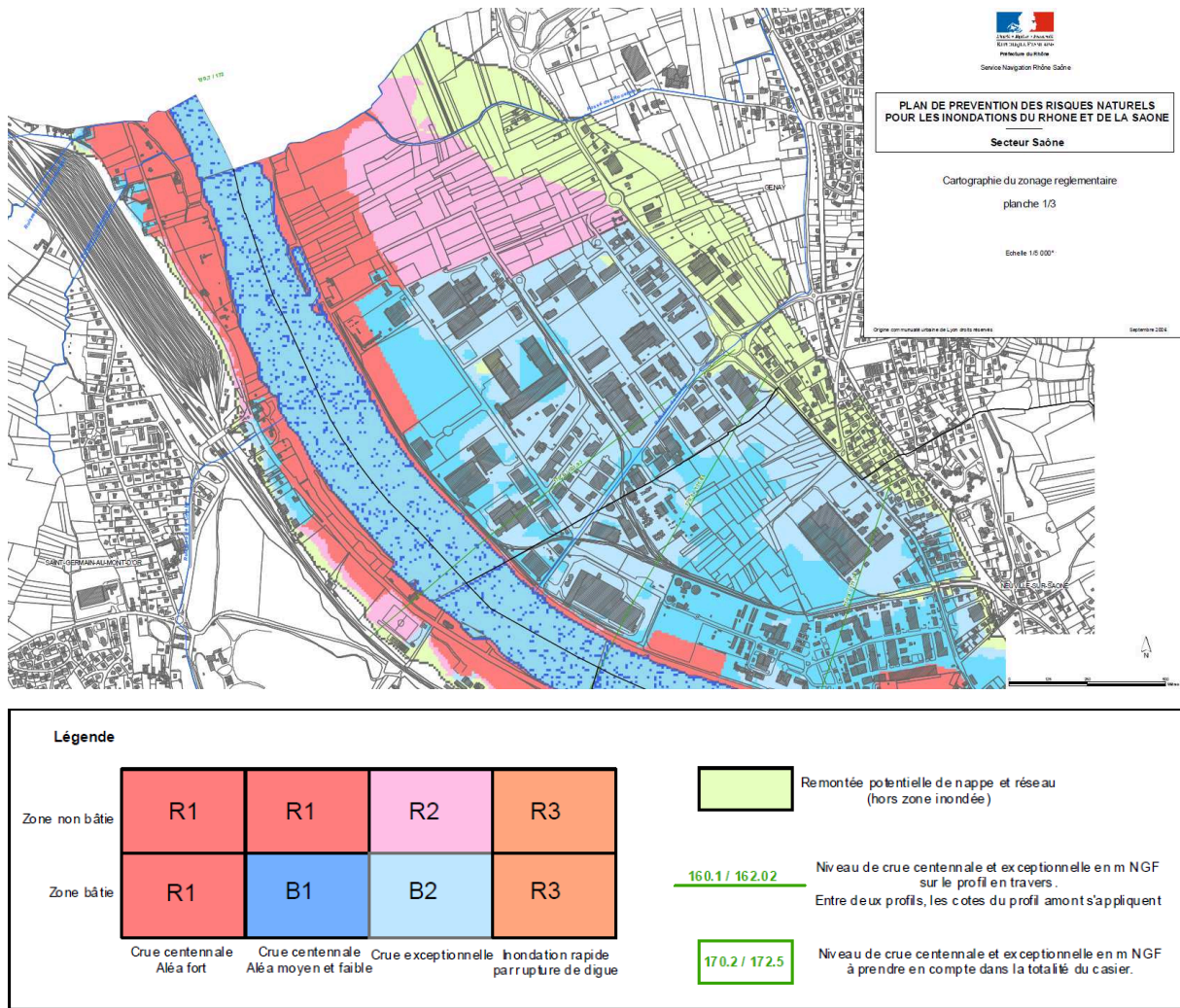


Figure 1.22. Extrait d'une carte réglementaire de PPRI sur la Saône, dans la ville de Lyon. Le niveau de risque est représenté par des aplats colorés qui figurent le croisement d'un aléa (fort, moyen, faible, exceptionnel) et d'une vulnérabilité (bâti, non bâti).

Cartes d'événements

Les cartes d'événements issus de risques présentent des événements naturels s'étant effectivement réalisés. Les événements passés constituent le socle des connaissances sur un aléa donné et peuvent également servir d'exemples marquants pouvant contribuer au développement d'une culture du risque pour le grand public (EXCIMAP, 2007, p. 20). Ces cartes traitent aussi bien des événements naturels et de leurs caractéristiques (ex : hauteur d'eau lors d'une crue, magnitude d'un séisme,... et date, dans le cas d'événements historiques) que de leurs conséquences (dommages, procédures de gestion de crise,...). Cette dualité d'informations est illustrée par la Figure 1.23.

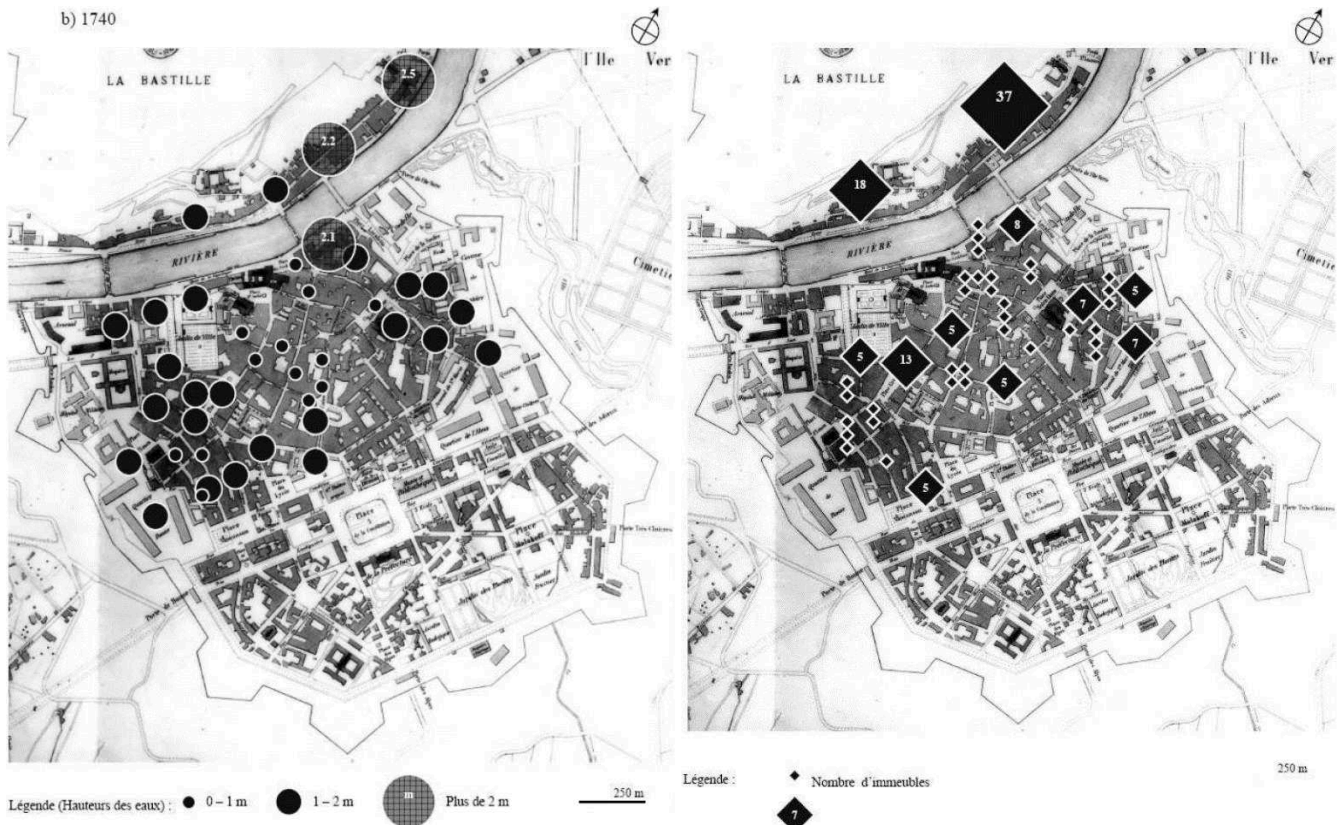


Figure 1.23. (A gauche) Hauteurs d'eau dans la ville de Grenoble lors de l'inondation de 1740 - (A droite) Nombre d'immeubles sinistrés lors de la crue de 1733 (Coeur, 2003)

Les cartes d'événements interactives intègrent souvent différents médias, visant à illustrer les événements : photographies, peintures ou dessins, articles de presses, cartes ou plans manuscrits (EXCIMAP, 2007). La troisième dimension (3D) est parfois employée, que ce soit pour étudier l'inscription des phénomènes naturels dans le relief ou pour renforcer le réalisme d'un événement, comme l'illustre la Figure 1.24.

La 3D est notamment utilisée pour illustrer l'impact d'événements naturels en milieu urbain, dans des cas où il n'existe pas d'observation directe des événements (événements très anciens ou simulations de conditions futures). La carte d'événement joue ainsi le rôle de reconstitution, soit reconstitution de l'événement lui-même, soit de ses dommages.



Figure 1.24. Simulation d'une crue centennale de l'ampleur de la crue de 1910 en Ile-de-France (Source : Institut d'Aménagement Urbain, EU Sequana 2016¹⁸)

Au regard de cette typologie, dans notre cas d'étude, nous souhaitons réaliser une carte d'événements issus de risques. Ce format permettra de mettre l'emphase sur les phénomènes naturels, leurs caractéristiques et leurs conséquences.

2.2.2. Une diversité d'échelles des cartes de risques

Le risque et les événements issus de risques peuvent être représentés à des échelles cartographiques variables : à grande échelle (échelle infra-communale, du 1/250^e au 1/25 000^e), à moyenne échelle (de la ville au pays) ou à petite échelle (du continent au monde).

Selon l'objectif de la carte et le public visé, des échelles différentes sont employées. Les cartes de niveau de risque ou à visée d'information sont souvent réalisées à moyenne ou à petite échelle. La carte de la Figure 1.25 est communiquée sur le site gouvernemental français Prim.net¹⁹ (bouquet Prévention des Risques Majeurs). Son contenu et son mode de diffusion indiquent qu'elle vise à communiquer une information générale sur le niveau d'aléa sismique à l'échelle du pays, à destination du grand public. L'échelle choisie par le cartographe traduit donc une volonté d'informer l'ensemble de la population du pays.

¹⁸ <http://www.iau-idf.fr/savoir-faire/nos-travaux/environnement/risques-naturels-et-technologiques/eu-sequana-2016.html>, consulté le 16/08/2016

¹⁹ <http://macommune.prim.net/gaspar/sismique.php>, consulté le 16/08/2016

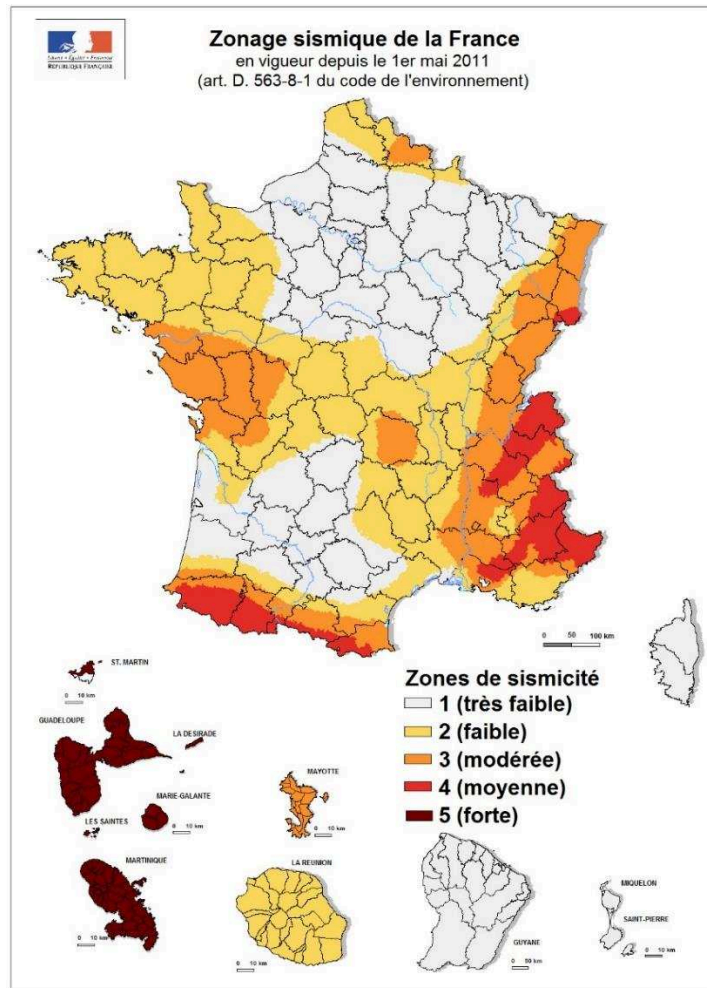


Figure 1.25. Carte de l'aléa sismique à moyenne échelle (Source : prim.net)

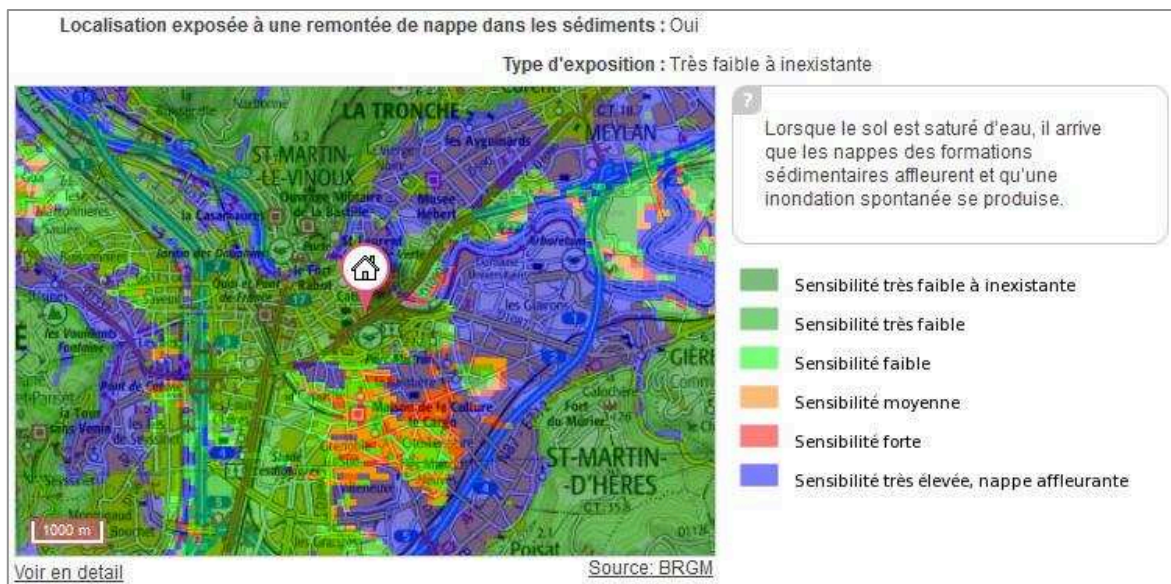


Figure 1.26. Carte à grande échelle de l'aléa inondation par remontée de nappe sédimentaire (source : portail Géorisques)

L'échelle de la carte est parfois dictée par la granularité spatiale de la donnée d'entrée. Dans l'exemple de la Figure 1.26, le maillage assez grossier des pixels met en évidence

l'imprécision relative des données si on se place à une échelle trop proche. En effet, la frontière entre un pixel vert et un pixel bleu sur la carte ne reflète pas une frontière rectiligne réelle existant sur le terrain, qui se traduirait par un changement brutal du niveau de risque à un mètre de distance. Visualiser ces données à une échelle trop grande n'a, dans ce cas, pas forcément de sens.

Enfin, le choix de l'échelle n'est pas anodin : il peut contraindre la forme visuelle de l'information cartographiée. Supposons que le cartographe cherche à représenter un événement d'inondation ayant touché une commune. A grande échelle, la localisation de l'inondation peut être représentée sous forme surfacique, par l'étendue de la zone inondée. A petite échelle, la taille de la zone inondée devient trop faible pour être visible. Le cartographe aura tendance à la localiser par une ligne, pour figurer le segment du cours d'eau qui a débordé, voire par un point si cette zone est trop petite. Ces deux échelles ne permettront donc pas d'accéder au même niveau d'information, alors que les deux cartes ont le même objectif, à savoir : localiser l'inondation.

Dans notre cas d'étude, nous souhaitons cartographier des événements historiques d'inondation, ayant impacté des zones limitées, avec un niveau de détail suffisant pour répondre aux besoins d'un public d'expert. L'échelle de la carte sera donc guidée par les données et l'étendue cartographiée correspondra à la zone impactée par l'inondation.

2.2.3. Les usages des cartes de risque

Les cartes de risques peuvent être utiles dans plusieurs contextes identifiés par la littérature. Selon Ledoux, il existe deux grandes phases dans la prévention des risques naturels : d'une part, la connaissance du risque et de ses composantes et d'autre part, la gestion du risque à l'échelle du territoire (Ledoux, 2006). Les actions formalisées pour la prévention et la gestion du risque (présentées au début de la section II.2.1) correspondent en partie aux besoins identifiés chez notre public cible.

Notre public cible a besoin de :

- maintenir la mémoire des événements,
- connaître le patrimoine ferroviaire,
- s'inspirer des inondations passées pour préparer les stratégies de gestion de crise, les itinéraires de substitution des trains, la réallocation des personnels qui ne peuvent pas rejoindre leur lieu de travail, etc.

Les réponses à ces différents usages amènent à identifier des types de cartes de risques, correspondant chacun à des actions spécifiques (Chesneau, 2006) :

- La *carte d'expertise* : il s'agit d'un document technique, élaborée par des techniciens experts dans le domaine des risques. Elle vise à quantifier et représenter les dimensions du risque le plus précisément possible, avec un enjeu opérationnel (de gestion) ou exploratoire (de découverte, de connaissance des phénomènes).
- La *carte d'action* : c'est une carte utilisée dans un contexte opérationnel pour prendre

des décisions. Il y a deux sous-types de carte d'action :

- Premièrement, la *carte d'aide à la décision* croise les enjeux et les aléas pour analyser les situations et les territoires à risque. Elle est utilisée pour la négociation entre acteurs, par exemple pour l'aménagement du territoire.
- Deuxièmement, la *carte de gestion de crise* sert à organiser les secours pour intervenir en cas de catastrophe. Elle est majoritairement utilisée par les services de Sécurité Civile pour cibler les zones de populations sensibles ou les équipements où intervenir en priorité.
- La *carte de contrôle* : elle sert à inventorier spatialement un ou plusieurs risques existant sur un territoire (risques naturels et technologiques) pour intégrer cette information lors de décisions territoriales. Ce type de carte peut par exemple permettre aux élus de prendre des orientations d'urbanisme.
- La *carte d'information* : plutôt à destination du grand public, cette carte peut avoir deux emplois. Le premier est de communiquer une idée globale de la répartition des risques, généralement à une petite échelle (pays, continent). Le second vise plutôt à la prévention des risques par la construction d'une culture des risques, chez les populations vivant dans une zone exposée. L'enjeu final de ce deuxième type de carte est d'améliorer la résilience des populations en cas de survenue d'un événement naturel.

Les cartes de risque peuvent avoir deux autres intérêts cités dans la littérature : elles permettent de visualiser les éléments constitutifs du risque (aléa, vulnérabilité, enjeux), donc quelque part de le matérialiser, de le rendre plus facilement appréhendable par les acteurs (Beck et al., 2006; Propeck-Zimmermann et Saint-Gerand, 2001) et ces cartes peuvent également servir d'outils de discussion, qui stimulent les échanges (Cauvin et al., 2007; Jacquinod et Langumier, 2010).

Dans le cadre de la cartographie des inondations historiques et de leurs impacts sur le système ferroviaire, le besoin de retour d'expérience sur les événements passés (cf. chapitre I) se traduirait plutôt par une carte d'expertise, à usage opérationnel ou exploratoire.

Des publics différents n'ont pas les mêmes usages de la carte ni les mêmes besoins de contenu. Par ailleurs, un besoin peut se traduire en plusieurs tâches nécessitant d'être réalisées avec la carte. La tâche précise à accomplir guide la façon dont l'information devrait être visualisée, pour maximiser l'efficacité de la carte (Wilkening et Fabrikant, 2011). Dans le contexte des risques, l'axiome de relativité de la cindynique nous faisait également présager que le contexte d'usage modifierait les besoins de données des utilisateurs (cf. section II.2.1.2).

On peut donc émettre l'hypothèse que, si un même public est confronté à plusieurs tâches possibles ou nécessaires pour atteindre son objectif, il faudra alors faire appel à plusieurs types de cartes pour maximiser leurs utilités et leurs utilisabilités respectives.

La littérature s'est attachée à comprendre les préférences de différents profils d'utilisateurs

pour en tenir compte lors de la conception de cartes qui leur sont destinées. Les résultats sont présentés dans la section suivante.

2.2.4. Profils d'utilisateurs

Les travaux sur l'utilisation des cartes de risques naturels permettent de définir quatre publics principaux, utilisateurs de ces cartes. Ces publics ont chacun des besoins spécifiques, qui ont été identifiés par des entretiens auprès de ces acteurs, dans le cas d'étude du risque inondations (V. Meyer et al., 2012; Palka, 2015) :

- Les décideurs ont besoin de prendre des décisions de gestion concernant un territoire qu'ils administrent. Ce public utilise plutôt des cartes d'aide à la décision qui représentent les niveaux de risque ou les zonages réglementaires, notamment car le format de ces cartes de gestion du risque est imposé par la Directive Européenne sur les Inondations (Parlement Européen et Conseil, 2007). Ce public n'est pas expert en cartes de risques, il ne les utilise que ponctuellement. Une étude a montré que les décideurs qui opèrent au niveau local ou semi-local préfèrent utiliser des cartes d'aléa, tandis que ceux qui opèrent au niveau régional préfèrent les cartes de risques qui intègrent les enjeux menacés (Scheuer et al., 2013).
- Les gestionnaires de crise. Ce public intervient en cas de crise pour porter secours aux populations et protéger les installations sensibles. Il est composé d'administrations locales ou régionales, de pompiers et de militaires. Ces acteurs ne sont pas habitués à utiliser des cartes de risques et souhaitent des cartes lisibles très rapidement, qui informent sur les zones touchées, les personnes à évacuer et les infrastructures critiques (ex : hôpitaux) à protéger (V. Meyer et al., 2012).
- Le grand public n'exprime pas nécessairement de besoin vis-à-vis du risque. Les acteurs institutionnels, en revanche, souhaitent l'informer des risques qui le concernent pour réduire sa vulnérabilité. Plusieurs auteurs ont montré que les cartes ne sont pas un moyen efficace d'encourager le grand public à agir préventivement aux risques. Au contraire, ce public a tendance à réfuter les informations de la carte en pensant qu'elles sont imprécises (Hagemeier-Klose et Wagner, 2009; Rowe et Frewer, 2000). Intégrer le grand public dans un processus de concertation pour co-produire les cartes de risques peut en revanche aider à les engager (V. Meyer et al., 2012). Ce public a peu d'expérience dans la lecture de cartes de risques et n'est pas familier avec les concepts techniques liés aux risques. Des cartes d'information sont réalisées à son intention. Ces cartes délivrent des informations simples, ne nécessitant pas de connaissances techniques, en faisant de préférence appel à des cas concrets d'inondations.
- Les experts techniques sur les risques. Ce public utilise les cartes de risques pour établir des stratégies de gestion du risque ou des mesures de protection (V. Meyer et al., 2012). Il est parfois lui-même producteur des cartes de risques. Les membres de ce public sont souvent experts dans l'utilisation de cartes de risques et ont le temps de les étudier en détail : cartes d'aléa, de risques et de dommages, qui peuvent présenter des informations techniques complexes (V. Meyer et al., 2012).

Les besoins du public cible de notre carte de récits d'inondations se rapproche de la

catégorie des experts techniques. Notre carte pourra donc intégrer les préconisations de contenu et de sémiologie adaptées à ce public.

2.2.5. Adapter les cartes de risques aux utilisateurs

Limites d'utilisation des cartes de risques

Il existe des cas où les cartes de risques peuvent être mal adaptées aux utilisateurs. Le contenu et la forme de représentation sont souvent fautifs (Palka, 2015) :

- le lecteur ne trouve pas les informations qu'il recherche car certains de ses objets d'intérêt sont manquants,
- le lecteur ne comprend pas la symbologie utilisée (syntaxe de l'information) ou ce que désignent les objets représentés (sémantique).

Une origine de ces deux problèmes est que les cartes de risque sont souvent élaborées selon un modèle « top-down » (V. Meyer et al., 2012), c'est-à-dire que le producteur de la carte impose une vision du risque aux utilisateurs qui ne correspond pas à leurs attentes réelles. Pour pallier cette limite, il faut donc respecter les bonnes pratiques de conception de carte et impliquer les utilisateurs dans le processus de conception de la carte. Certaines études menées auprès d'utilisateurs ont permis de définir des contenus cartographiques et des formes de représentation adaptées aux différents publics.

Préconisations sur les cartes de niveau de risque, d'aléa, d'enjeux et de dommages

Les consultations menées auprès des différents publics (entretiens, ateliers en groupe et test utilisateur), à l'échelle européenne dans le cadre du projet RISK MAP, ont permis de dresser une liste du contenu des cartes de risques adapté à chaque public (V. Meyer et al., 2012). Dans leurs préconisations, ces auteurs fusionnent les catégories d'« expert » et de « décideurs » sous le terme « *strategic planners* » (gestionnaires stratégiques). Le premier résultat de l'étude est une liste de données d'entrée et de densité d'information adaptées à chaque public, qui est présentée dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3. Contenu des cartes de risques requis pour trois profils d'utilisateurs : les experts techniques, les gestionnaires de crise et le grand public (V. Meyer et al., 2012)

	Gestionnaires stratégiques	Gestionnaires de crise	Grand public
Densité/complexité de l'information	- Elevée	- Elevée	- Faible
Aléa	- Etendue de l'inondation et profondeur (plusieurs niveaux de probabilités) - Vitesse des écoulements lorsque disponible	- Etendue de l'inondation et profondeur (plusieurs niveaux de probabilités) - Profondeur critique et vitesse - Lien aux phases d'alerte	- Etendue de l'inondation et profondeur (probabilité élevée, moyenne, faible et exemples d'événements récents si disponibles) - Lien aux phases d'alerte

	Gestionnaires stratégiques	Gestionnaires de crise	Grand public
Conséquences/risques	<ul style="list-style-type: none"> - Dommages spécifiques à l'événement, dommages moyens annuels (pour évaluation économique) - Risques économique, social, culturel et environnemental - Infrastructures critiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre de personnes à risque (à évacuer) - Infrastructures critiques (à protéger ou évacuer) : hôpitaux, fourniture d'énergie et d'eau, infrastructures de transport 	<ul style="list-style-type: none"> - Bâtiments (affectés) - Routes (affectées)
Informations additionnelles	<ul style="list-style-type: none"> - Protections existantes contre les inondations, zones protégées, risque résiduel 	<ul style="list-style-type: none"> - Informations de gestion de crise : points de rassemblement, routes d'évacuation, etc. - Protections existantes contre les inondations, points faibles potentiels, zones protégées - Utilisabilité des routes d'évacuation, des hôpitaux, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Information de gestion de crise les plus importantes : abris, points de rassemblement, routes d'évacuation, hôpitaux

Des recommandations sur la forme cartographique des données adaptées à chaque public ont également été réalisées par les mêmes auteurs (Fuchs et al., 2009; V. Meyer et al., 2012). Ils conseillent notamment de contrôler la densité et la complexité des informations, le nombre de classes de la légende, la présence ou non d'informations sur les dommages et d'éléments annexes à la carte servant à expliciter son contenu (Tableau 1.4). Ils ont ensuite réalisé des modèles de cartes intégrant l'ensemble de ces préconisations, dont un exemple est retranscrit sur la Figure 1.27 :

- utiliser un fond de carte pâle et simple, sur lequel les données importantes contrastent,
- intégrer le niveau d'aléa en faisant varier la valeur de la couleur, en bleu pour rappeler la couleur de l'eau d'inondation,
- pour un public d'experts, intégrer le niveau d'enjeux économiques associé aux bâtiments en cas de dommages, la localisation des infrastructures critiques, des zones écologiques vulnérables et des dispositifs de protection tels que les digues.

Tableau 1.4. Recommandations pour la visualisation des données dans les cartes de risques, à destination de différents publics (V. Meyer et al., 2012)

	Gestionnaires stratégiques	Gestionnaires de crise	Grand public
Densité/complexité de l'information	Elevée	Elevée, mais accès rapide à l'information	Faible, compréhensible rapidement et facilement
Légende	Jusqu'à 5 classes	Pas plus de 3 classes	Pas plus de 3 classes
Aléa et conséquences dans la même carte ?	Oui	Oui	Principalement informations sur l'aléa
Éléments additionnels	Optionnels	Symboles (utilisés fréquemment), Texte	Symboles (parlant d'eux-mêmes), Texte

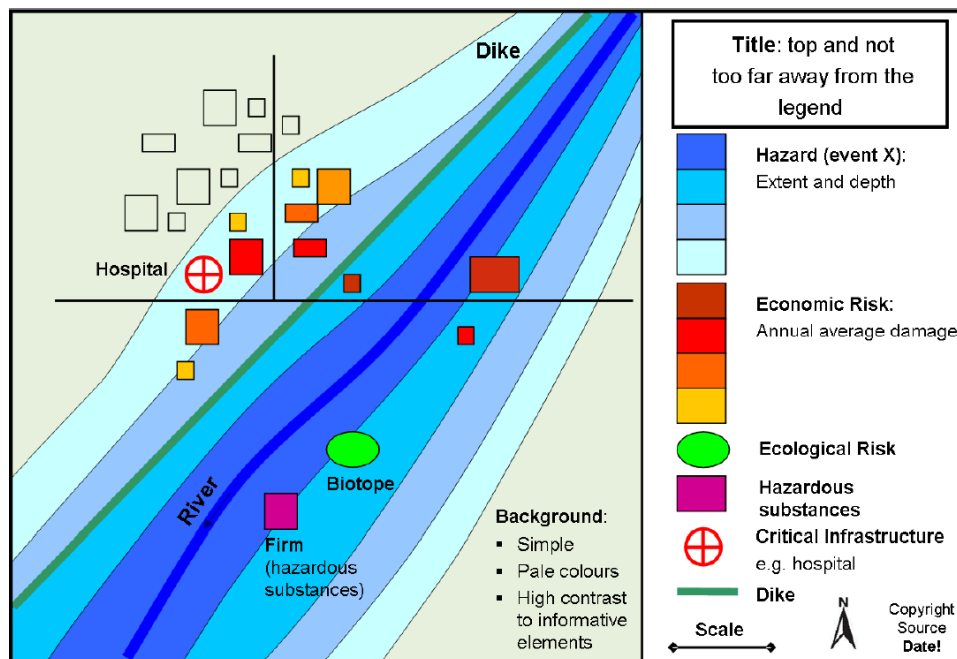


Figure 1.27. Proposition de carte de risque adaptée aux gestionnaires stratégiques (décideurs et experts des inondations) (Fuchs et al., 2009)

Dans un contexte de gestion de crise d'inondation, des tests utilisateurs ont permis de produire des « profils cartographiques », résultant de l'association entre un profil d'utilisateur et un modèle cartographique correspondant le mieux à leurs attentes (Palka, 2015). Dix profils cartographiques ont été produits par trois profils d'utilisateurs :

- les élus locaux (décideurs) ont produit 2 modèles de cartes contenant de grandes quantités d'informations pour appréhender la situation dans son ensemble : cartes des itinéraires d'évacuation indiquant aussi le niveau d'aléa et les zones de refuge, cartes des bâtiments à évacuer indiquant de nombreuses informations sur les habitants, les zones refuges et leurs caractéristiques,
- les membres des forces de secours (gestionnaires de crise) ont produit 5 cartes monothématiques et détaillées, en considérant plusieurs échelles: cartes des zones impactées à l'échelle départementale, cartes des zones refuge à l'échelle des quartiers de gestion, cartes d'intervention avec axes d'accès et d'évacuation de la zone, ...,
- les habitants (grand public) ont produit 3 modèles de cartes simples, croisant peu d'informations, qui montrent l'étendue de l'inondation ou les itinéraires d'évacuation.

Palka a ensuite demandé aux utilisateurs d'évaluer un exemple type de carte appartenant à chacun des 10 profils cartographiques. Les résultats montrent, étonnamment, que tous les utilisateurs, quel que soit leur profil, trouvent que les cartes produites à destination du grand public sont les plus utiles et les plus lisibles. Les cartes à destination du grand public sont également celles qui conduisent au meilleur taux de bonnes réponses à des questions de lecture.

Ces résultats signifient que les cartes les plus simples sont les plus efficaces et qu'il est

probablement plus utile de faire plusieurs cartes, par thématique, qu'une carte chargée combinant l'ensemble des informations.

Cette conclusion est légèrement nuancée par un effet de seuil : quand la quantité d'information augmente, la lisibilité perçue augmente, jusqu'à un certain seuil au-delà duquel la lisibilité diminue. Par ailleurs, l'augmentation de la quantité d'informations fait toujours baisser le taux de bonnes réponses, sauf chez les décideurs pour qui une hausse de la quantité d'information améliore le taux de bonnes réponses jusqu'à un certain seuil au-delà duquel le score re-diminue.

Il existe un compromis à trouver entre la complétude et la densité d'informations communiquées dans la carte. Une carte intégrant un faible nombre d'informations serait perçue comme plus lisible et plus utile. Pour un public d'experts tel que le nôtre, la carte pourra a priori intégrer une quantité d'information légèrement plus élevée tout en restant efficace (V. Meyer et al., 2012).

L'introduction de l'interactivité à la carte, qui permet aux utilisateurs de modifier l'affichage et de filtrer des informations, est par ailleurs susceptible de modifier le rapport entre quantité d'information et lisibilité.

Préconisations sur les cartes d'événements

L'usage et le public des cartes d'événements sont moins étudiés dans la littérature que les cartes de niveaux de risque. Ces cartes peuvent être destinées (EXCIMAP, 2007) :

- soit au grand public, à l'échelle locale de leur habitation, pour développer leur culture du risque en les confrontant à des exemples concrets d'événements,
- soit par les experts techniques comme donnée d'entrée pour évaluer l'aléa, calibrer des modèles,...
- soit par les gestionnaires de crise, dans le cas où l'inventaire des événements est suffisamment exhaustif et à jour, comme outil qui permet de prioriser les zones d'intervention des forces de secours.

Nous n'avons cependant pas trouvé d'études qui confrontent ce type de carte à des utilisateurs, pour déterminer les contenus et les représentations qui leur seraient plus adaptées.

2.2.6. Synthèse

Il existe plusieurs typologies associées aux cartes de risques : selon le contenu, l'usage ou le public utilisateur des cartes, les préconisations de représentations diffèrent.

En croisant les résultats de ces classifications pour les appliquer à notre cas d'étude, nous pouvons retenir certaines conclusions :

- La carte que nous souhaitons réaliser est une « carte d'événements ». Cette carte

pourra montrer l'emplacement ou l'extension des phénomènes naturels et la répartition des dommages. Il est utile d'associer du contenu multimédia à ce type de carte, afin d'illustrer les événements. Nous y ajoutons la description de l'aspect dynamique des événements, qui a été peu traité par la littérature.

- L'échelle de carte sera a priori imposée par les données et l'étendue de la zone couverte par l'inondation.
- La carte sera utilisée dans un objectif d'expertise. Elle devra représenter les événements issus de risque avec un grand niveau de détail, et pourra être mobilisée dans deux cas de figure : soit dans un contexte opérationnel suite à un événement dommageable, pour retrouver l'historique d'un ouvrage ou d'une inondation, soit dans un contexte de découverte et de prise de connaissances générales.
- La carte produite est à destination d'un public d'experts techniques. Ce public est a priori capable de lire des cartes contenant des informations techniques complexes. Il est intéressé par voir les caractéristiques des phénomènes naturels, des dommages, les enjeux associés aux objets vulnérables et les dispositifs de protection. La densité d'information représentée sur la carte peut être modérée sans porter atteinte à la lisibilité.

Les travaux que nous avons restitués, concernant l'utilité et l'utilisabilité des cartes de risque, concernent uniquement des cartes statiques, destinées à être imprimées sur papier. Or l'introduction de l'interactivité augmente la quantité d'information qui peut être communiquée et modifie les usages des cartes. La préférence pour les cartes papier peut s'expliquer par le fait que, pour diverses raisons, le format statique reste de nos jours une référence pour les professionnels s'occupant de la gestion du risque (Saint-Marc et al., 2014).

L'intégration de l'interactivité est susceptible de modifier le rapport de l'utilisateur à la carte. Les résultats menés sur des cartes statiques doivent donc être adaptés dans le cas des cartes interactives ou dynamiques. Nous proposons dans la suite du texte un bref état de l'art des applications de géovisualisation destinées à l'étude des risques, en les classant par usages.

2.3. Visualisations interactives et animées de risques naturels

Les applications de géovisualisation sont encore peu développées dans l'étude des risques naturels (Davoine, 2014). Tate et al. (2011) citent des verrous technologiques, logiciels et le manque d'entraînement des utilisateurs comme étant des freins à l'utilisation de ces systèmes dans l'étude des risques.

La plupart des géovisualisations de risques naturels existantes visent à présenter des événements issus de risques (ex: Arnaud et Davoine, 2011; Davoine et al., 2009; Kubíček et al., 2010; Lienert et al., 2011), tandis que celles orientées vers la lecture des niveaux de risques, d'aléa ou de vulnérabilité sont moins nombreuses (ex: Ho et Jern, 2013; Opach et Rød, 2013). Ces applications s'adressent à une diversité d'usages, de l'inventaire simple à

l'exploration de données. Nous explorons ici un exemple de géovisualisation appartenant à chaque catégorie d'usage du cube de MacEachren et Kraak (1997) (cf. section II.1.2.2). Les caractéristiques de ces géovisualisations peuvent inspirer la création de notre propre outil, destiné à visualiser les récits d'inondations historiques.

Dans la catégorie des géovisualisations à usage de *présentation* d'information, la Base de Données Historiques des Inondations²⁰ (Villanova-Oliver et al., 2013) inventorie les inondations historiques survenues en France, dans une interface spatio-temporelle (Figure 1.28). Elle fournit une vue d'ensemble des documents historiques relatant des événements d'inondations, à la fois dans le temps grâce à un histogramme temporel, et dans l'espace à travers une carte. Les vues spatiales et temporelles sont synchronisées : la sélection d'une période dans la ligne de temps actualise le nombre d'événements affichés sur la carte.

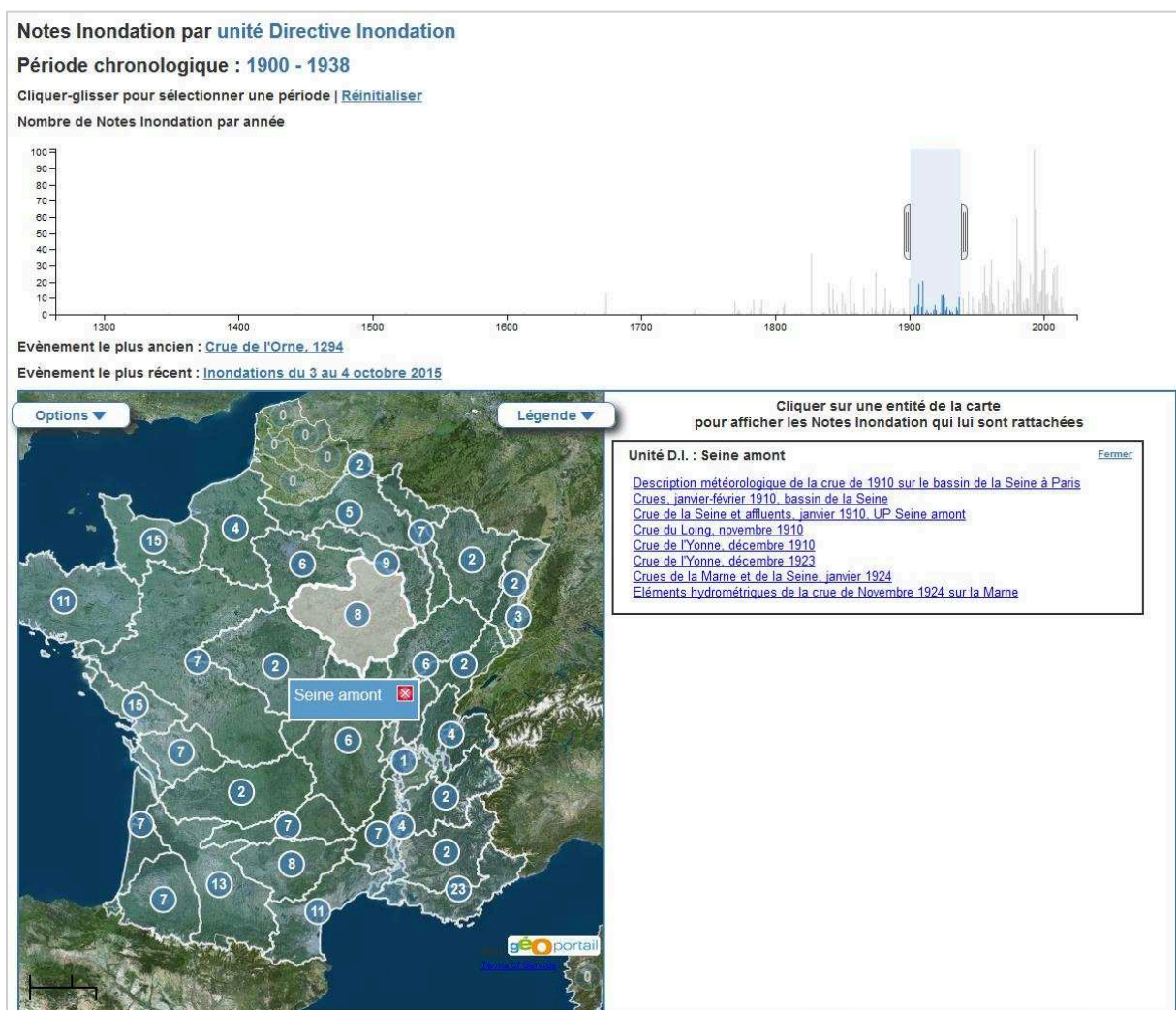


Figure 1.28. Interface d'inventaire d'événements de la base de données historique sur les inondations (Source : <http://bdhi.fr>)

²⁰ Base de données du Ministère de l'Ecologie, disponible sur <http://bdhi.fr/appli/web/visualiseur> (consulté le 24/08/2016)

La combinaison des requêtes spatiales et temporelles et l'actualisation des résultats en temps réel fournissent une fluidité d'usage et une liberté de navigation pour les utilisateurs. Cette application remplit cependant un objectif de présentation de données uniquement, la carte ne permettant pas de synthétiser ou d'analyser les informations relatives aux événements représentés.

En poursuivant vers plus de complexité dans les usages proposés, l'outil ViewExposed (Opach et Rød, 2013) permet de visualiser les « niveaux » de vulnérabilité aux risques naturels en Norvège. Cette application a une visée de *synthèse* d'informations, au sens où elle donne à voir des informations bien connues avec un degré d'interactivité modéré, mais à destination d'un public expert, constitué des forces de secours et des représentants des communes.

L'interface combine (Figure 1.29) :

- une vue cartographique de la vulnérabilité à l'échelle des communes,
- un graphique en coordonnées parallèles qui montre le niveau des différents indicateurs, qui sont agrégés dans la vulnérabilité globale affichée sur la carte, et
- le tableau des données brutes, indiquant les valeurs numériques de ces indicateurs.

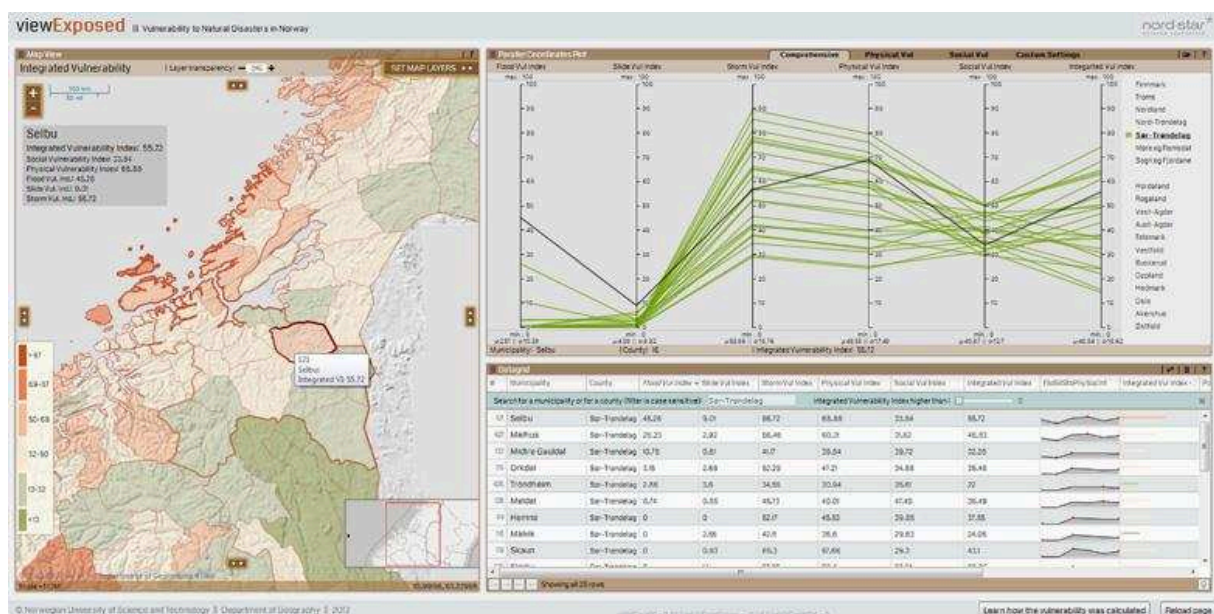


Figure 1.29. Interface de l'outil ViewExposed qui permet de visualiser les composantes de la vulnérabilité des communes aux risques d'inondation, de tempête et de coulées de boue (Opach et Rød, 2013)

Les forces de secours comme les représentants des communes ont été impliqués dans le processus de conception de l'application, pour choisir les indicateurs d'évaluation de la vulnérabilité et les fonctionnalités à intégrer dans l'interface. Les besoins de ces deux publics se sont révélés être similaires :

- Pouvoir modifier le calcul d'évaluation de la vulnérabilité globale,
- Identifier les zones les plus vulnérables,

- Comprendre pourquoi ces zones sont vulnérables.

L'intégration d'un graphique en coordonnées parallèles à l'interface sert à répondre en particulier à cette dernière question, en montrant les sous-composants inclus dans le calcul de la vulnérabilité globale retranscrite sur la carte. La synchronisation entre la carte et les graphiques permet de situer l'entité géographique sélectionnée sur la carte parmi les autres séries statistiques dans les graphiques et tableaux.

Une seconde application d'*analyse* de données, cette fois appliquée à des cartes d'événements, a été développée par Lienert et al. (2011). Elle permet de visualiser des données hydro-météorologiques, collectées en temps réel et de comparer des données projetées, issues de modèles de prévision, des données en temps réel et des observations historiques (Figure 1.30). L'interface permet donc de croiser plusieurs natures d'informations.

Les mesures hydro-météorologiques associées aux événements sont localisées dans la carte à l'emplacement des stations de mesure, sous la forme de figurés ponctuels. La sémiologie ici appliquée aux événements issus de risques peut intéresser notre cas d'étude. La variable visuelle « forme » est utilisée pour représenter le type de paramètre mesuré (épaisseur de neige, pression atmosphérique, débit des cours d'eau, ...), la « taille » reflète la valeur absolue de la mesure et la « teinte » est associée à la période de retour. La sémiologie utilisée a donc pour but de co-visualiser trois dimensions de l'information concernant les entités ponctuelles, ce qui est élevé puisque les règles de la sémiologie graphique conseillent de n'en visualiser que deux pour garantir la lisibilité de la carte.

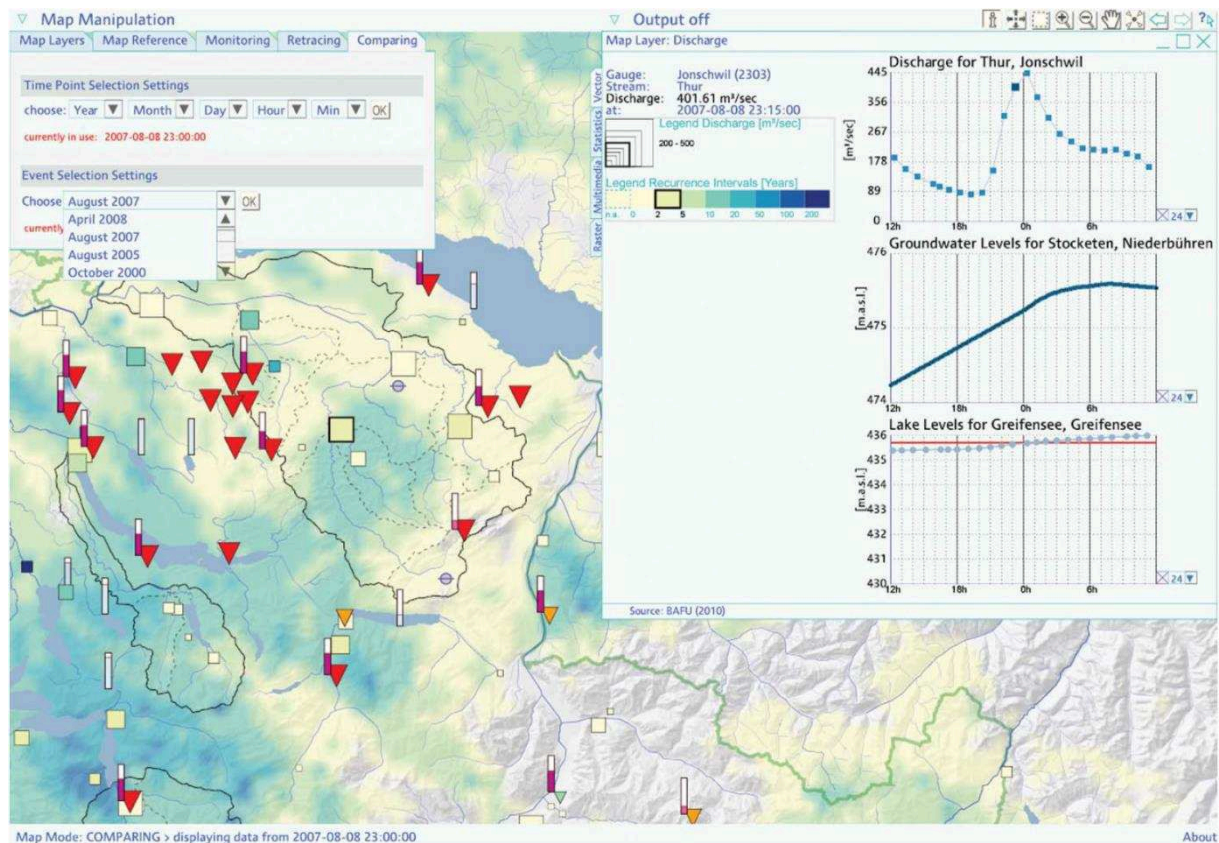


Figure 1.30. Visualisation des données hydro-météorologiques de l'inondation du 8 août 2007 en Suisse (Lienert et al., 2011)

Une autre caractéristique qui peut intéresser notre cas d'étude est la possibilité de comparer les données relatives à plusieurs événements hydro-météorologiques. Les données à comparer sont affichées dans une seconde carte qui peut être soit visualisée en parallèle de la première, soit affichée successivement avec la première sous la forme d'une animation clignotante. L'animation est également employée pour visualiser le cumul des quantités de pluie ou l'augmentation des débits au cours du temps, de façon à donner une vision de la dynamique des événements.

Parmi les géovisualisations aux usages d'*exploration* dans le domaine des risques, on peut citer l'application SIHREN (Arnaud, 2009). Elle vise à explorer les événements passés issus de risques naturels dans l'espace et dans le temps. L'interface de l'application contient trois vues synchronisées : une fenêtre cartographique, animable et convertible en 3D selon la topographie du terrain, une fenêtre « évolution », qui montre sous forme de graphique des données temporelles ou non-temporelles et une fenêtre « documentaire » visant à afficher un tableau de données et des documents multimédias (Figure 1.31). L'animation permet de parcourir l'évolution de phénomènes représentés dans la fenêtre évolution, la carte s'animant dynamiquement en même temps que le graphique. L'application intègre également la visualisation de l'imperfection des données (imprécisions, incertitudes). Cette application étend le framework existant GenGHIS (Moisuc et al., 2005), mais les extensions proposées (contenu multimédia, graphiques non temporels, intégration de l'imperfection),

n'ont pas été développées ni évaluées auprès d'utilisateurs.

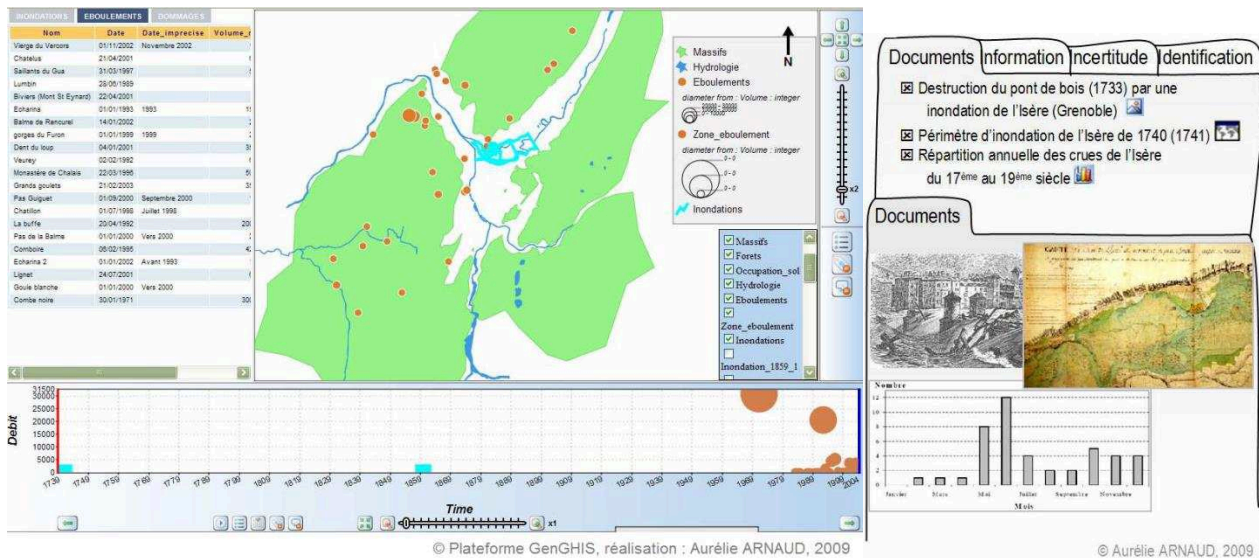


Figure 1.31. (A gauche) Interface de visualisation des événements issus de risque dans l'outil SIHREN ; (à droite) Maquette d'une fenêtre documentaire permettant d'accéder à du contenu multimédia (Arnaud, 2009)

Confronter les interfaces de géovisualisation aux utilisateurs permet d'identifier les faiblesses de ces outils ou des fonctionnalités manquantes, mentionnées par plusieurs auteurs parmi les applications que nous avons exploré ici (Ho et Jern, 2013; Opach et Rød, 2013) :

- La première limite est la complexité de lire certains graphiques accompagnant la carte. Dans l'évaluation de l'outil d'Opach et Rød (2013), les utilisateurs rejettent en bloc le graphique en coordonnées parallèles, jugé « trop scientifique » et inutile, mais leur avis change après explication du fonctionnement de l'outil.

Cela démontre l'importance d'une phase d'apprentissage pour les utilisateurs, qui peuvent ne pas être habitués à ce type d'interface encore innovante ;

- L'échelle spatiale peut être inadaptée aux besoins des utilisateurs : par exemple, les représentants communaux ont besoin d'accéder aux données à une échelle sub-communale, pour décrire plus finement leur territoire ;
- Les utilisateurs souhaitent pouvoir modifier les paramètres de calcul des indicateurs composites, par exemple pouvoir modifier la pondération associée à chaque paramètre intervenant dans le calcul de la vulnérabilité globale ;
- Il existe un besoin de pouvoir générer des rapports relatifs à un objet ou un sous-ensemble de données intéressants.

Ce bref état de l'art nous permet de tirer enseignement des fonctionnalités proposées par ces applications, ainsi que des forces et faiblesses identifiées, dans le but d'améliorer l'expérience d'exploration dans les données d'événements issus de risques. Nous pouvons notamment retenir que les interfaces de géovisualisation dans le domaine des risques

intègrent souvent :

- des graphiques liés dynamiquement à la carte, qui montrent soit des attributs supplémentaires des entités cartographiées (ex : Figure 1.29), soit la répartition temporelle et la dynamique des processus (ex : Figure 1.30 et Figure 1.31) ;
- des fonctions de sélection et de filtres des événements par localisation, par dates ou par attribut.

Dans notre cas d'étude, l'outil de géovisualisation qui serait adapté aux experts du système ferroviaire s'inscrirait dans un objectif de *synthèse* et d'*analyse* des événements historiques.

Conclusion de la Partie 1

Cette première partie nous a permis de situer le contexte de ce travail. La question qui sous-tend notre recherche est de trouver comment valoriser les informations historiques sur les inondations et leurs impacts, à destination des experts du système ferroviaire qui y sont confrontés.

Le système ferroviaire est un système complexe, durement impacté par les inondations majeures (sections I.1 et I.2). A cause de cette complexité, il n'est pas aisé à appréhender dans son ensemble et il n'est pas possible de répondre aux besoins de tous les agents qui interviennent dans la gestion des inondations. Dans un premier temps, nous avons donc choisi d'adapter la méthode de valorisation des inondations historiques à destination du public des experts en hydrologie et hydraulique, travaillant pour le gestionnaire de l'infrastructure ferroviaire. Ils constituent notre public cible.

D'un point de vue méthodologique, pour concevoir une méthode de valorisation qui soit adaptée à ce public cible, le travail de thèse a suivi une démarche commune en ingénierie, centrée sur l'utilisateur final : 1) comprendre ses besoins et connaître son profil, 2) s'appuyer sur les travaux existants pour identifier des méthodes qui répondent aux besoins et 3) élaborer une proposition qui soit adaptée aux besoins et aux pratiques des utilisateurs.

L'analyse a révélé que le format qui semble le mieux répondre aux besoins des experts qui se posent face au risque inondation est celui du retour d'expérience (REX) (section I.3.3.). Les entretiens avec les experts ont notamment montré qu'ils ont besoin de comprendre la dynamique spatiale des processus survenus pendant une inondation. Or le format du REX intègre peu la dimension spatiale des événements et ne permet généralement pas d'analyser la propagation dynamique des phénomènes dans l'espace. Nous posons l'hypothèse que l'association systématique d'une cartographie aux retours d'expérience permettrait de révéler plus d'informations sur la dimension spatiale des phénomènes.

Suite à un état de l'art sur les cartes de risques (sections II.2.2. et II.2.3.), il apparaît que la visualisation de retours d'expérience n'est pas abordée dans les travaux existants. Il s'agit d'un manque pour répondre à notre problématique. Le travail de thèse a donc visé à combler ce manque en tentant de déterminer comment réaliser des cartes de récit des événements historiques issus de risques, pour analyser les retours d'expérience dans leur dimension spatiale et au cours du temps. La carte de récit peut permettre de décrire « l'enchaînement des faits ayant conduit à un événement redouté » (Chapurlat et Aloui, 2007), qui est le principe du retour d'expérience.

Parmi les outils pouvant répondre à notre problématique, nous avons vu que les cartes peuvent être enrichies de fonctions interactives, d'animation et de contenu multimédia, qui peuvent soutenir l'utilisateur dans son exploration et l'analyse des phénomènes cartographiés (section II.1.2.). La géovisualisation introduit notamment des environnements multi-vues qui permet de co-visualiser plusieurs dimensions de l'information (spatiale, temporelle et attributaires) pour les mettre en relation dans l'analyse des risques naturels. Ce type d'outil s'adapterait donc bien à l'exploration de retours d'expériences, dans lesquels

les déroulements spatial et temporel des faits sont intimement liés.

L'analyse des pratiques des experts du ferroviaire (section I.3.4.) a révélé que ce public est en majorité utilisateur de cartes interactives, mais qu'il les met principalement en œuvre pour des tâches de présentation et de collecte de données, et peu pour des tâches plus complexes d'analyse. La carte et l'interface de géovisualisation proposées devront donc rester simple pour être utilisables, hypothèse qui est renforcée par la littérature sur l'usage des cartes de risques : les cartes de risque comportant un nombre faible d'informations, en se centrant sur les plus pertinentes, sont jugées les plus utiles et les plus lisibles par l'ensemble des publics confrontés aux risques (section II.2.2.5.).

Cependant, intégrer la dimension spatiale au REX puis les visualiser dans une carte soulève des problématiques de représentation et de visualisation du récit des événements :

- Premièrement, comment formaliser le récit, c'est-à-dire en construire un modèle susceptible d'être projeté dans une carte ? La façon dont le récit sera structuré et les données sélectionnées peut avoir une incidence sur la forme de leur visualisation cartographique. L'état de l'art peut nous renseigner sur la représentation d'événements, de processus de risques et de leur insertion spatiale et temporelle, qui nous permettrait de bâtir une représentation de données adaptée à nos objectifs.
- Deuxièmement, comment visualiser des récits sous forme cartographique ? Et en particulier, comment intégrer la visualisation du temps et des dynamiques dans la carte ? En nous appuyant sur des méthodes de cartographie et de géovisualisation élaborées dans la littérature, nous pourrions formuler des propositions adaptées à nos données et aux utilisateurs. Il convient en particulier de s'intéresser à la façon dont les cartes sont perçues par les utilisateurs, et aux facteurs qui améliorent la lisibilité des cartes, dans l'optique de construire des visualisations efficaces et adaptées.

Des éléments de réponses à ces deux problématiques, provenant d'un état de l'art des travaux de la littérature, seront abordés respectivement dans les Parties 2 et 3 de ce mémoire. Nos contributions pour la géovisualisation de récit d'événements historiques issus de risques seront ensuite présentées dans la 4^{ème} et dernière partie.

En s'appuyant sur les données issues de notre cas d'étude, la Partie 2 commence par explorer la problématique de la représentation des données de récit et expose des propositions de formalisations pour structurer les données. S'agissant des données qui seront par la suite visualisées cartographiquement, notre attention se portera prioritairement sur les objets impactés par l'événement d'une part et sur la dynamique de cet événement d'autre part.

Partie 2

Formalisation de la connaissance du domaine

Partie 2 : Formalisation de la connaissance du domaine

La construction d'un retour d'expérience (REX) cartographique passe d'abord par la collecte des données concourant au REX et ensuite par l'homogénéisation de ces données sous une forme structurée.

Les données sur les événements historiques de risques proviennent majoritairement d'archives papier disséminées dans une variété de fonds (fonds des propriétaires et opérateurs ferroviaires, des services de l'Etat, centres d'archives nationales, fonds privés...). Pour limiter la durée nécessaire à la collecte, notre travail s'est appuyé sur cinq cas d'études d'inondations historiques, ayant fait l'objet de monographies dans la thèse de Boudou (2015) et issues de différents régimes hydro-climatiques :

- L'inondation du Tarn de mars 1930 (débordement de cours d'eau),
- L'inondation d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales (crue éclair),
- L'inondation de l'hiver 1947-48 dans les Vosges (débordement lent amplifié par la fonte nivale),
- L'inondation de novembre 1999 dans l'Aude (crue éclair),
- L'inondation de 2001 dans la Somme (inondation lente par remontée de nappes phréatiques).

Les résultats de l'analyse des besoins (cf. sections I.3.2 et I.3.3), nous ont permis de cibler les informations intéressant notre public cible, devant être intégrées dans un REX inondations. Il s'agit des phénomènes naturels, des dommages sur l'infrastructure ferroviaire, des impacts sur les circulations et des mesures de gestion de crise et de réaction mises en place par les acteurs du système ferroviaire.

Les données collectées sont hétérogènes dans leur format (rapport, photographie, carte, plan d'ouvrage...) et leur description des événements. Elles nécessitent d'être structurées dans un format exploitable informatiquement, pour pouvoir être visualisées dynamiquement et interrogées dans une géovisualisation. Une ontologie informatique a ainsi été développée pour structurer et stocker les données historiques. Cette ontologie formalise les récits d'inondations en modélisant la chronologie des événements et les processus d'effets dominos.

Cette partie présente tout d'abord un échantillon des données d'entrée collectées et leurs caractéristiques. Elle présente ensuite l'ontologie, nommée IDISFER, construite pour stocker les données. Cette ontologie se situe à l'intersection de plusieurs domaines thématiques, notamment le champ des risques naturels et celui du système ferroviaire. Un état de l'art des ontologies du domaine sur lesquelles elle s'aligne est présenté.

III/ Formalisation du récit des événements issus de risques dans une ontologie

1. Données d'entrée

La recherche documentaire sur les cinq inondations historiques (listées dans le paragraphe d'introduction de la Partie 2) s'est majoritairement concentrée sur les fonds d'archives SNCF. La recherche a été menée par une archiviste dédiée au projet. Elle a été complétée ponctuellement par d'autres fonds d'archives : Archives Nationales de Pierrefitte, Archives Nationales du Monde du Travail de Roubaix et fonds documentaires privés, et par des sources en libre accès sur le web, notamment : Mémoire des catastrophes²¹ de l'Institut pour l'Histoire et la Mémoire des Catastrophes (IHMEC), Pluies extrêmes²² de Météo France et le forum amateur Trains du Midi²³.

Une méthode de collecte des documents a été élaborée avec l'aide d'un historien, de façon à accélérer la recherche puis l'exploitation des documents. Cette méthode est décrite dans l'Annexe 1.

Au total, 801 documents ont été collectés sur les cinq inondations. La nature des documents collectés est variée : rapports techniques des services ferroviaires, feuilles de budget, courriers échangés entre services ou avec des tiers (notamment les collectivités locales), coupures de presse, photographies, dossiers de travaux, plans et cartes. Un échantillon de documents est illustré sur la Figure 2.1.

A partir des documents sources, cinq synthèses documentaires ont été produites, chacune relative à une des inondations étudiées. Une synthèse retrace le récit d'une inondation dans un format tabulaire. Au sein du tableau de récit d'une inondation, chaque événement issu de risque survenu pendant l'inondation était stocké dans une ligne, tandis les colonnes répertoriaient sa localisation, sa date, sa description, sa source documentaire ainsi que la nature des imperfections éventuellement relatives à chacun de ces attributs.

²¹ <http://memoiresdescatastrophes.org>, consulté le 02/07/2014

²² <http://pluiesextremes.meteo.fr/>, consulté le 18/11/2014

²³ <http://www.trainsdumidi.com/>, consulté le 19/08/2014

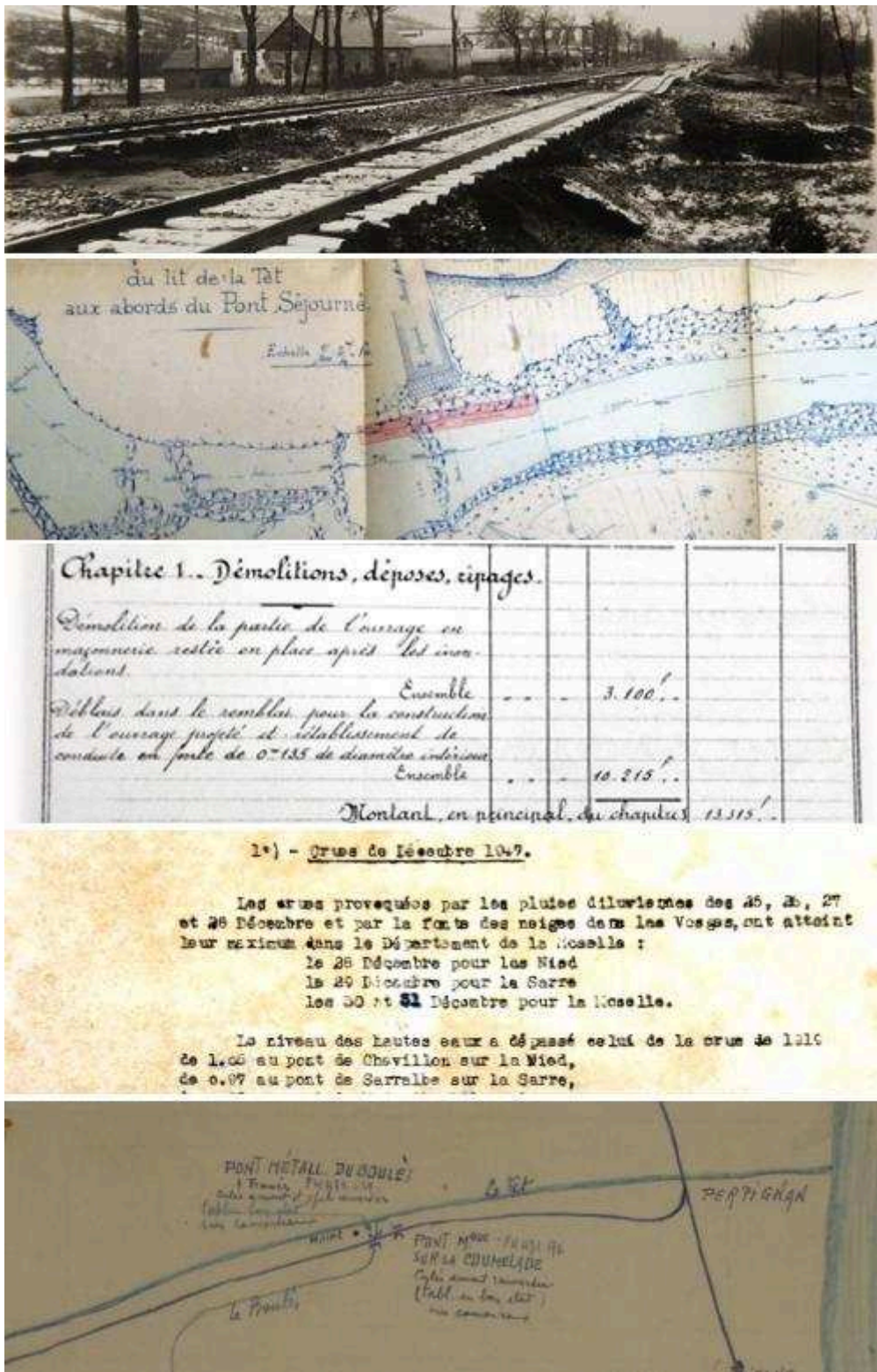


Figure 2.1. Exemples de documents collectés dans les fonds d'archives SNCF. De haut en bas : 1) Photographie de la brèche d'Ars-sur-Moselle lors de l'inondation de décembre 1947, 2) Plan de travaux d'aménagements sur la rivière Têt (1922), 3) Extrait d'un compte estimatif de travaux de reconstruction (1915), 4) Rapport technique relatant les incidents survenus pendant l'inondation de 1947, 5) Carte des dommages aux ouvrages en terre suite à l'inondation d'octobre 1940.

Les données ont été synthétisées et structurées de façon empirique durant les processus de collecte et de synthèse des données. Dans l'objectif de les interroger dynamiquement dans

une carte interactive, il semble utile de les conceptualiser plus avant et notamment de réfléchir à la façon dont seront modélisés les événements du récit. La façon dont les données sont conceptualisées et structurées va également avoir un impact sur la manière dont elles pourront être visualisées dans la carte. En effet, le graphique n'est qu'un vecteur qui restitue un effort de modélisation réalisé en amont. Comme l'expriment Blaise et Dudek (2013), la visualisation n'est que « l'étape permettant de faire jouer les concepts, attributs, relations entre concepts et attributs, afin de dégager une compréhension globale de la dynamique temporelle étudiée ».

L'ensemble des données collectées a ensuite été organisé sous la forme d'une ontologie, comme explicité dans la section suivante.

2. Le choix d'une ontologie : définitions et objectifs

2.1. Définitions

Une ontologie informatique est un système de représentation des connaissances d'un domaine, qui répertorie l'ensemble des concepts, des propriétés et des relations existants entre ces objets (Wikipedia, 2014). En tant que « dictionnaires » de concepts, les ontologies peuvent avoir différentes formes et niveaux de complexités (Figure 2.2), allant du simple glossaire ou d'une taxonomie plus structurée jusqu'aux ontologies formelles incluant des inférences logiques (Kruchten et al., 2007; Ushold et Gruninger, 2004).

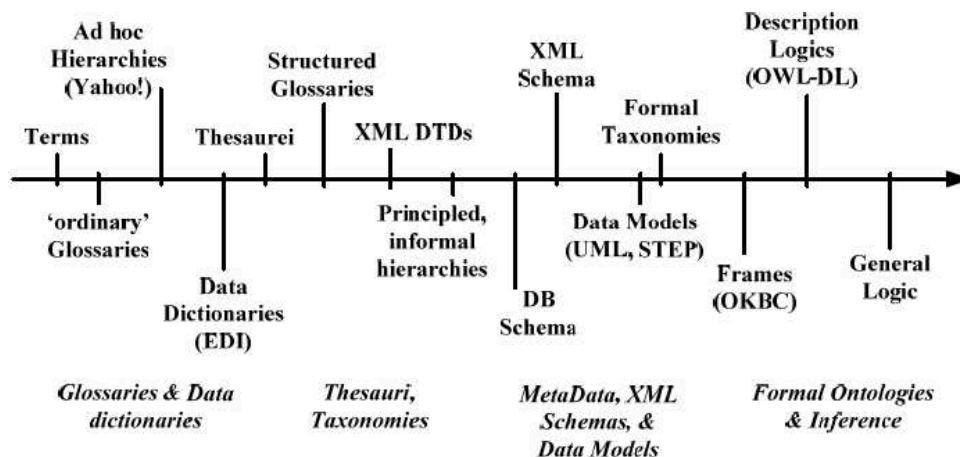


Figure 2.2. Les types d'ontologies (Kruchten et al., 2007)

Les ontologies formelles sont constituées d'un ensemble de « triplets » de concepts, chacun incluant deux objets, tels qu'une gare et une ligne ferroviaire, reliés ensemble par un axiome, par exemple « une gare est située sur une ligne ferroviaire ». Les concepts généraux sont appelés des « classes » : le « sujet » est le concept d'intérêt décrit par la relation du triplet, le « prédicat » est la propriété du sujet que l'on souhaite décrire et l'« objet » est la valeur

associée au sujet par le prédicat. Une classe conceptuelle peut être instanciée en un objet particulier du monde réel, qu'on appelle un « individu ». Les classes comme les individus peuvent également être reliés à des « attributs » via des relations appelées des « propriétés » (Figure 2.3). Dans une ontologie, chaque concept ou relation est documenté pour définir la signification précise qui lui est associée, afin d'éviter toute ambiguïté dans l'emploi des termes. Cette sémantique précise facilite leur partage et leur réutilisation.

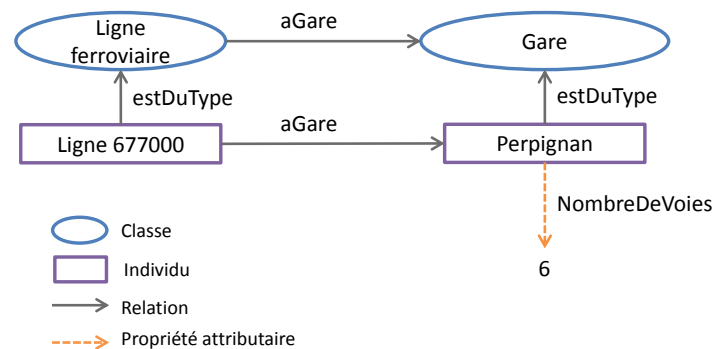


Figure 2.3. Exemple d'un triplet d'ontologie, incluant des classes, des individus instanciés et des propriétés

2.2. Intérêts des ontologies

Les ontologies sont exprimées dans un langage interprétable automatiquement par ordinateur, comme par exemple le langage RDF/OWL. Au même titre que les bases de données, les ontologies formelles peuvent être utilisées pour organiser et stocker l'information. Elles peuvent ensuite faire l'objet de requêtes pour récupérer les données et conduire des analyses.

L'une des principales forces de ce format est qu'elles permettent de définir la sémantique des données indépendamment de la représentation choisie (Lorenz et al., 2005). Par conséquent, elles sont très flexibles et plus faciles à partager et à réutiliser que les bases de données. Flexibles car elles permettent d'extraire, de modifier une partie du schéma de l'ontologie ou d'intégrer de nouveaux concepts sans avoir besoin de modifier tout le modèle de données (Morris et al., 2015). Partageables car elles sont par nature conçues indépendamment du format, de la taille et de la structure des données à stocker (Lorenz et al., 2005).

La sémantique contenue dans les données permet de définir des contraintes sur les classes et les relations, ce qui peut être utilisé pour interroger les données de façon améliorée en tenant compte des interactions entre concepts. Enfin, le processus de construction d'une ontologie peut permettre à des interlocuteurs de disciplines différentes de s'accorder sur un vocabulaire commun. Les ontologies sont appropriées pour servir de format standard d'échange entre partenaires (Köpf, 2010) et sont efficaces pour garantir l'interopérabilité des données, ce qui est particulièrement pertinent dans un contexte concurrentiel, ouvert et

international tel que celui du transport ferroviaire.

2.3. Intérêts d'une ontologie pour décrire les inondations et leurs impacts sur le système ferroviaire

Dans le domaine des risques naturels, des ontologies ont été développées dans une variété de contextes : pour évaluer le niveau de risques dans des territoires à l'échelle locale (ex: Scheuer et al., 2013), pour surveiller les phénomènes de risques en temps réel (ex: Kollarits et Wergles, 2009) ou pour définir un vocabulaire commun et développer un modèle interopérable entre les acteurs impliqués dans la gestion de crise (ex: Babitski et al., 2009; Bénaben et al., 2008).

En ce qui concerne la gestion des risques vis-à-vis du système ferroviaire, la littérature a défini un ensemble de cas dans lesquels l'usage d'ontologies serait pertinent. Par exemple, la réalisation d'inférences sur le schéma d'ontologie peut permettre de déterminer l'ensemble des lignes qui seraient indisponibles si un point donné du réseau était en défaut (Morris et al., 2015). Elles peuvent accélérer la communication entre les acteurs du ferroviaire impliqués lors d'une crise (opérateurs, gestionnaires des circulations, chargés de maintenance) grâce à la mise en place d'une infrastructure de données partagée, d'un vocabulaire commun explicite et grâce à l'alimentation automatique des outils d'aide à la décision des différents partenaires (Umiliacchi et Henning, 2008). Les ontologies peuvent également être utilisées pour faire de la maintenance prédictive : l'analyse des données historiques peut permettre d'identifier des motifs d'événements susceptibles d'impacter le système et évaluer la probabilité que de tels événements surviennent pendant une certaine période (Umiliacchi et Henning, 2008).

Les ontologies sont donc un format de stockage de données flexible, aisément partageable, qui permettent d'interroger et de conduire des raisonnements sur les données. Pour construire une ontologie sur les impacts des inondations sur le système ferroviaire, il nous faut lier plusieurs domaines de connaissances :

- le domaine des risques naturels,
- le domaine de la localisation spatiale, temporelle et la définition du concept d'événement,
- le domaine de l'infrastructure ferroviaire.

Le champ des risques naturels recouvre lui-même plusieurs sous-domaines, faisant l'objet de développements d'ontologies indépendantes : les aléas naturels, la vulnérabilité des communautés, les impacts physiques et sociaux des événements, les pratiques de prévention de risques, les processus organisationnels et ressources de la gestion de crise et le rétablissement du système à long-terme (Lindell et Prater, 2003; Tierney et al., 2001). Dans le cadre de cet état de l'art, nous choisissons d'explorer uniquement les ontologies qui décrivent les aléas naturels, les impacts physiques des aléas sur les infrastructures et les

aspects matériels de la période de crise et post-crise. Nous excluons dans ce travail les aspects de la prévention et la protection contre le risque, qui viennent en amont de notre sujet, et les aspects humains et organisationnels de la crise.

L'état de l'art sur les ontologies des domaines connexes à notre sujet nous renseigne sur la façon dont les événements issus de risques ont été perçus et conceptualisés par les auteurs de la littérature. Ces travaux antérieurs nous aideront à définir les concepts à intégrer dans IDISFER, comment décrire le temps et l'espace et comment formaliser les effets dominos.

3. Etat de l'art sur les ontologies de risques naturels et d'événements

3.1. Les ontologies de risques naturels et d'inondations

Le risque naturel est défini comme la cooccurrence, dans le temps et dans l'espace, d'un aléa (probabilité d'occurrence d'un phénomène dangereux) et d'éléments exposés vulnérables (enjeux humains, économiques ou environnementaux). Les ontologies de risques naturels décrivent souvent cinq aspects différents des situations à risque (Bénaben et al., 2008; Hajji, 2005; Kruchten et al., 2007; Scheuer et al., 2013) :

- Le territoire physique soumis au risque (ex : topographie, hydrologie),
- Les éléments exposés (ex : populations, infrastructures, activités, ...),
- Les phénomènes naturels et leurs propriétés (ex : intensité, probabilité, étendue),
- L'impact des événements naturels sur les éléments exposés (i.e. les dommages) et
- Les acteurs, procédures, ressources et territoires de la gestion de crise.

Les termes utilisés pour traiter les phénomènes naturels varient selon les auteurs : *risque*, *aléa*, *menace*, *danger*, *phénomène*, *événement* (Bénaben et al., 2008; P.-A. Davoine, 2014; Lindell et Prater, 2003; Saval et al., 2009). A partir de ces terminologies, nous définissons les termes suivants : un *phénomène* (ex : débordement d'un cours d'eau donné) est la manifestation d'un *aléa* (ex : aléa inondation) susceptible de toucher un territoire. La réalisation concrète du phénomène est appelée un *événement issu de risque* (Arnaud, 2009) (ex : l'inondation du 3 octobre 1988 à Nîmes).

Kruchten et al. (2007) caractérisent un événement issu de risques par 4 propriétés : sa nature (inondation, feu, séisme, ...), sa magnitude, sa localisation et l'aire affectée (ou les objets impactés). Scheuer et al. (2013) proposent également de qualifier l'événement par son intervalle de retour (durée moyenne entre plusieurs événements ayant une intensité supérieure ou égale à un seuil défini). Pour ces auteurs, l'intensité de l'événement est un concept générique qui a trois sous-classes : l'étendue affectée, la hauteur d'eau (pour une inondation) et la durée. Lindell et Prater (2003) ajoutent à cela deux caractéristiques associées aux catastrophes : la vitesse de propagation et la disponibilité d'indices pré-catastrophe (indices pour la prévision).

Dans le cas d'application des inondations, un certain nombre de propriétés peuvent être

associées aux phénomènes. Un phénomène d'inondation peut avoir différentes natures : le débordement d'un cours d'eau, d'un lac, une submersion marine, une crue éclair, une hausse du niveau de la nappe phréatique ou un ruissellement de surface, tandis que ses causes météorologiques peuvent être une tempête, une tempête tropicale, des précipitations élevées sur le long-terme, la fonte rapide des neiges ou la rupture d'un ouvrage de retenue (EM-DAT DB - CRED, 2009; Lang et Coeur, 2014). Les phénomènes météorologiques ayant causé le phénomène d'inondation peuvent être décrits à l'aide d'ontologies dédiées, telles que la NNEW Weather Ontology (citée dans Liu et al., 2013). Cette ontologie dédiée à la description de données météorologiques contient 8 sous-systèmes : humidité, luminosité, mesures, précipitations, pression, tempête, visibilité et vent. Chaque sous-système contient la liste des types de phénomènes (ex : bruine, pluie, neige, pour le module précipitations), les types de mesures associées (ex : accumulation, hauteur, fréquence...) et les indicateurs statistiques qui leur sont liés (ex : minimum, moyenne, écart-type...). Enfin, les caractéristiques des objets hydrologiques ou géologiques du territoire peuvent être extraites et étendues à partir d'ontologies de haut niveau telles que l'ontologie environnementale SWEET²⁴ ou la généraliste DBPedia²⁵.

Au cours d'une inondation, les phénomènes et événements causent des dommages aux objets du territoire. Ces objets impactés forment des systèmes qui peuvent être décrits par l'ontologie. Nous nous intéressons en particulier à la description des infrastructures et des ressources qu'elles portent ou transportent, ces concepts étant situés au cœur du système ferroviaire et particulièrement vulnérables aux inondations.

3.2. Les objets impactés : ontologies d'infrastructure et ontologies ferroviaires

3.2.1. Ontologies génériques d'infrastructure

Selon Scheuer et al. (2013), un événement d'inondation peut causer des dommages aux infrastructures, aux populations ou à l'environnement. Ces auteurs ont distingué deux catégories parmi les infrastructures : les infrastructures matérielles (telles que les bâtiments) et les infrastructures institutionnelles (l'environnement administratif).

Kruchten et al. (2007) ont proposé une ontologie générique pour décrire les infrastructures matérielles d'un territoire. Dans leur modèle (Figure 2.4), une infrastructure transporte un type donné de ressources, qui alimente le territoire. Une infrastructure est composée d'éléments d'infrastructure, qui peuvent être connectés entre eux. Les éléments d'infrastructure sont soit passifs (la ressource transite simplement par eux), soit actifs (ils produisent ou transforment la ressource). Chacun est défini par un « état », qui reflète sa capacité à remplir son rôle, et par un « statut opérationnel » (en service ou hors-service), qui dépend de son état et de l'état des éléments qui lui sont reliés.

²⁴ <https://sweet.jpl.nasa.gov/>, accédé le 02/04/2016

²⁵ <http://wiki.dbpedia.org> et <http://dbpedia.org/fct/> pour rechercher des concepts, accédé le 02/04/2016

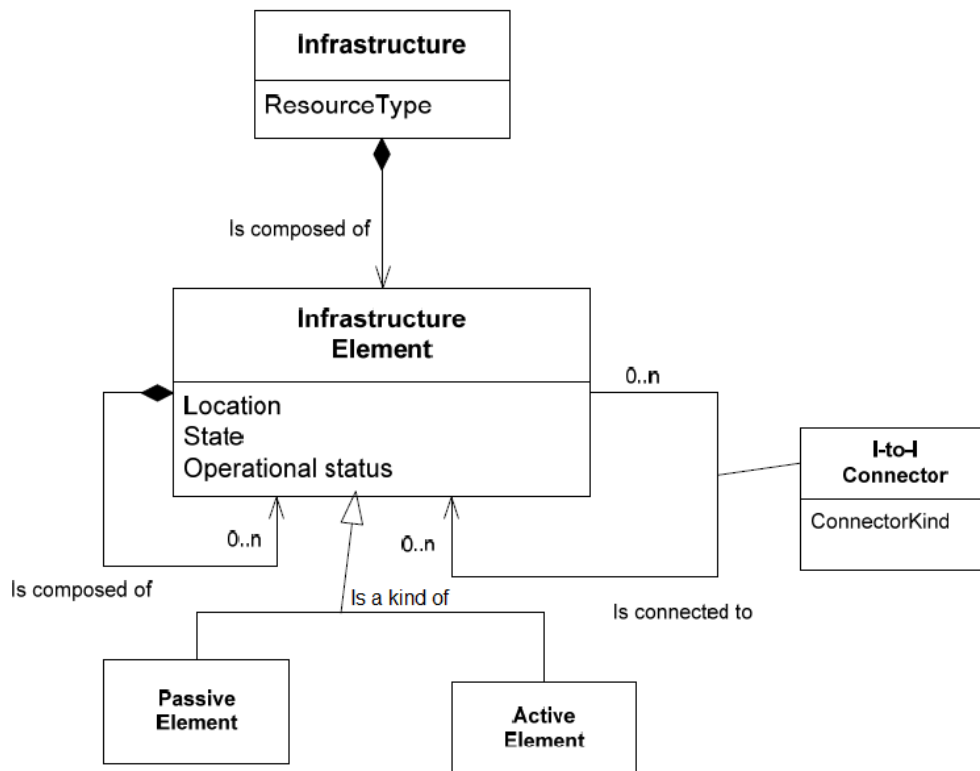


Figure 2.4. Modèle générique d'une infrastructure (Kruchten et al., 2007)

Les relations entre éléments d'infrastructure sont soit une relation de dépendance (si A est hors-service, alors B est hors-service), une dépendance avec délai (si A est hors-service, B sera fatalement hors-service quelques temps après) ou une collocation (A et B partagent le même emplacement physique – ex : une fibre optique et un tuyau de gaz qui passent dans un pont routier). Scheuer et al. (2013) modélisent l'interdépendance entre diverses infrastructures qui sont physiquement connectées grâce à une matrice d'incidence : description des effets de chaque élément i sur tous les éléments j , au cours du temps.

Conrad et al. (2006) décrivent dans leur modèle quatre types de réseaux d'infrastructure : l'énergie, l'eau, les télécommunications et les transports. Bien qu'il s'agisse d'un ensemble de schémas logiques et pas d'une ontologie formelle, ce travail est intéressant en ce qu'il lie les différents réseaux entre eux, en modélisant les effets en chaîne potentiels si l'un de ces systèmes est en défaut.

3.2.2. Ontologies du système ferroviaire

Dans le cas particulier du système ferroviaire, plusieurs ontologies ont été proposées pour décrire le système, en allant du niveau global, par exemple la Railway Domain Ontology (RDO) (Köpf, 2010), à un niveau très détaillé pour répondre à des questions spécifiques, telle que l'ontologie sur l'interaction véhicule-voie (Lu et al., 2006). Nous nous focalisons sur les ontologies à un niveau de détail global, d'une part parce que les inondations sont susceptibles d'affecter tous les composants du système ferroviaire et d'autre part parce que

les informations décrivant les impacts des inondations historiques sur les composants ferroviaires sont généralement disponibles à un niveau de détail relativement faible (ex : « rupture du rail », plutôt que « rupture de la vis maintenant le rail »).

Une première formalisation des données relatives au système ferroviaire est le standard RailML²⁶ dédié à l'échange de données. Il décrit 3 volets du système ferroviaire, au format XML : l'infrastructure, le matériel roulant et la gestion des horaires de circulation. Cependant, il ne s'agit pas d'une ontologie formelle, les concepts et la sémantique associée ne sont pas diffusés sous format ouvert et elle n'est donc pas aisément réutilisable. La première ontologie à décrire le système ferroviaire dans son ensemble a été la Railway Domain Ontology développée dans le projet InteGRail (Umiliacchi et Henning, 2008). La RDO reste une ontologie générale décrivant le système ferroviaire à un niveau macro. Elle reprend et formalise les concepts de RailML au format ontologique et décompose la « gestion des horaires » de RailML en deux catégories de concept : les circulations et la gestion du trafic. Cette ontologie a servi de base au projet RaCoOn (Railway Core Ontologie) actuellement en cours (Morris et al., 2015), qui vise à modéliser le domaine ferroviaire avec plus de détails que la RDO, en combinant un jeu d'ontologies du domaine ferroviaire.

D'autres ontologies existent, qui traitent d'aspects particuliers du domaine ferroviaire mais qui peuvent être une source d'inspiration dans la construction de notre modèle : une ontologie du trafic ferroviaire britannique (Inkster, 2009), une ontologie d'horaire de trains (Mohan et Arumugam, 2005) ou une ontologie de validation de nouveaux plans de lignes (Lodemann et Luttenberger, 2010).

Les composants du système ferroviaire sont ensuite susceptibles d'être impactés par les risques naturels. Il faut donc décrire les interactions qui lient les phénomènes naturels au système ferroviaire, sous la forme de dommages.

3.3. Description des impacts des phénomènes naturels sur les infrastructures

En Histoire, le récit historique est une exposition neutre, sous une forme textuelle, des faits survenus dans le passé (Delacroix, 2016). Le récit s'inscrit dans le territoire en affectant une chronologie linéaire d'objets géographiques. En adaptant cette définition à notre contexte de récit des événements historiques issus de risques, relater les faits consistera à retranscrire sur une carte une succession d'événements qui découlent de la survenue d'une catastrophe naturelle.

Le terme « événement » est ici employé dans un sens générique qui correspond au « fait historique » des historiens, et pas dans le sens phénoménologique souvent employé en hydrologie. Selon la définition de Zacks et Tversky (2001), un événement est « un segment de temps à une localisation donnée, qui est discrétisé par un observateur pour avoir un début et une fin ». Selon cette logique, une catastrophe naturelle, c'est-à-dire le système composé

²⁶ <https://www.railml.org/en/>

d'un phénomène naturel dommageable et de l'ensemble de ses conséquences, peut être segmentée en plusieurs événements élémentaires.

Il est donc possible de formaliser le récit d'une inondation historique comme une succession d'événements, qui seraient liés par des relations temporelles et de causalités. Nous nous intéressons ici aux ontologies qui décrivent les événements, leur conceptualisation dans le cadre des risques et les effets dominos qui les lient.

3.3.1. Ontologies d'événements

L'état de l'art de Troncy et al. (2010), en ingénierie des connaissances, parcourt 9 ontologies contenant le concept d'*événement*. Ce concept se retrouve dans plusieurs ontologies de haut-niveau : ABC Ontology (Lagoze et Hunter, 2001), Dolce+DnS Ultralite (Gangemi et Mika, 2003), OpenCyc²⁷ et (non citée dans l'article de Troncy et al.) DBpedia. Ce concept est par ailleurs adressé dans des ontologies de domaines spatio-temporelles : The Event Ontology (Raimond et Abdallah, 2007a), EventML-G2 (IPTC, 2008) et le modèle F (Scherp et al., 2009).

A partir de ces différents modèles, Troncy et al. proposent l'ontologie intégrative LODE (Linking Open Descriptions of Events) présentée sur la Figure 2.5. La classe générale *Événement* est caractérisé par un *Intervalle temporel* et un *Lieu*. Les *éléments géographiques*, de la base de données Geonames, sont des sous-classe de *Lieu*. Un événement peut lui-même être composé d'autres événements. Chacun peut avoir un *Facteur* (cause) et un *Produit* (résultat/conséquence). Des sous-types d'événements sont également définis dans le modèle : l'événement au sens de l'ontologie BIO, qui est un événement de la vie d'une personne et l'événement au sens de l'ontologie CIDOC, qui est une période (i.e. un intervalle temporel) localisée dans l'espace qui implique des participants.

²⁷ Source : <http://www.opencyc.org/>, consulté le 05/01/2017.

3.3.3. Ontologies d'effets dominos

Dans le domaine des risques naturels, certains événements dommageables peuvent causer d'autres événements par effet en chaîne, ce qui est appelé « effet domino » dans la terminologie des risques naturels. Une ontologie conceptuelle qui décrit les effets dominos et les dommages qui leur sont associés a été développée pour étudier les catastrophes combinant risques naturels et risques industriels (Dubos-Paillard et Provitolo, 2012). Dans cette ontologie, la classe « événement » a deux relations avec elle-même : une relation de composition (un sous-événement peut composer un événement plus large) et une relation causale (un événement peut causer un événement) (Figure 2.6).

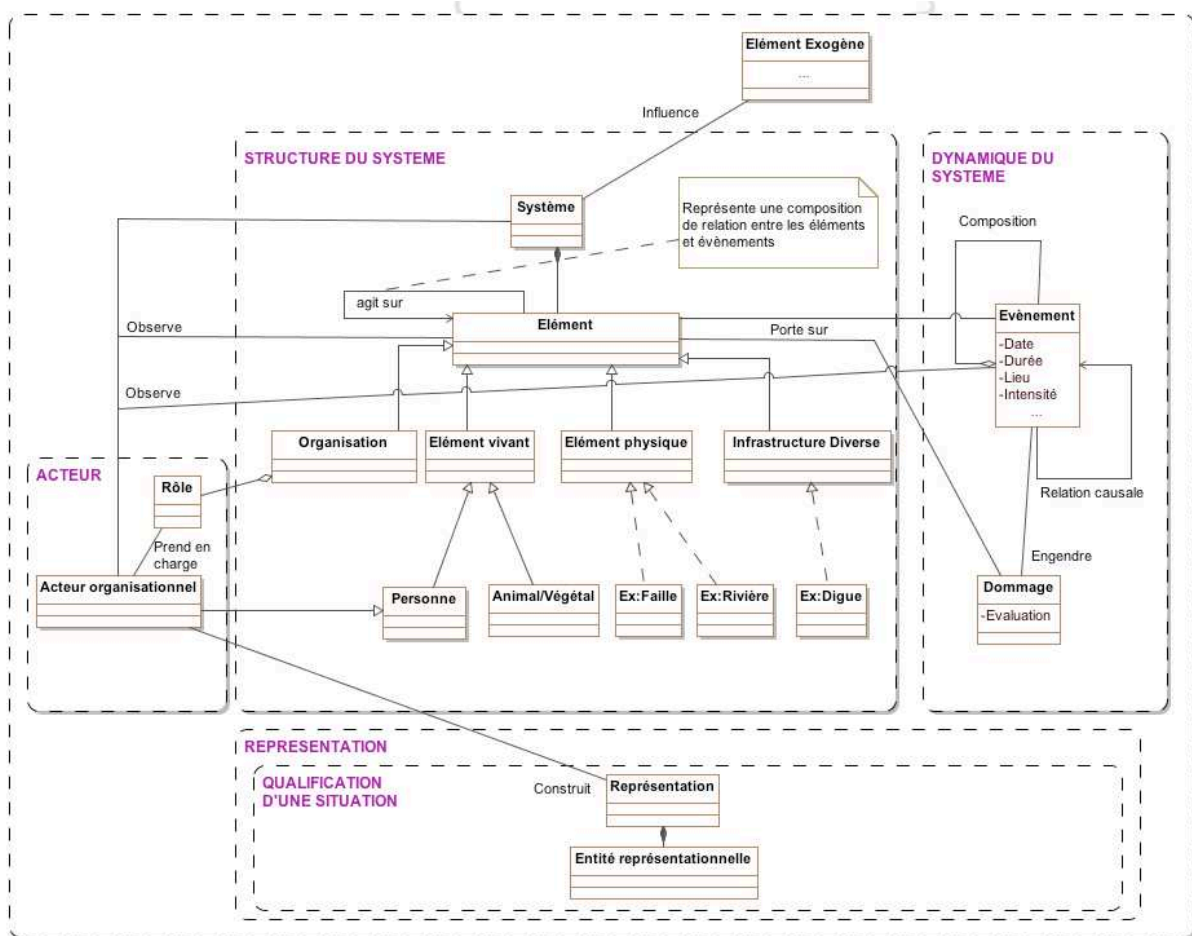


Figure 2.6. Ontologie décrivant la structure d'un système, les événements dommageables et les effets dominos (Provitolo et al., 2009)

La combinaison de ces travaux nous permet de décrire le système soumis au risque, gravitant autour d'un réseau d'infrastructure, et les phénomènes naturels, qui surviennent sous la forme d'événements et engendrent des dommages. Si l'on se ramène à la définition de l'événement donnée par Zacks et Tversky (2001) (cf. introduction de la section III.3.3), celui-ci se définit comme « un segment de temps, à une localisation donnée ». Les événements doivent donc être ancrés dans un système de localisations spatiales et temporelles, que nous

explorons dans la suite.

3.4. Formalisation des dimensions spatiales et temporelles

3.4.1. Ontologies spatiales

Plusieurs ontologies et bases de données de référence existent pour représenter l'information géographique. Nous citons ici les standards utilisés dans les ontologies de risques naturels, analysées dans l'état de l'art de Liu et al. (2013, p. 9) : le standard GeoSPARQL, la norme GDF de l'ISO, et la base de données GeoNames.

Le standard GeoSPARQL de l'Open Geospatial Consortium (OGC, 2012) vise à représenter et à interroger les données géographiques dans le web sémantique, en particulier en RDF. L'ontologie GeoSPARQL contient six composants :

- Le composant central définit les concepts de haut-niveau de l'ontologie : la classe *objet spatial* (SpatialObject) contient deux sous-classes : elle est composée d'un *élément spatial* (Feature) et d'une *géométrie*. Cette décomposition entre l'identité d'un objet spatial et sa forme géométrique telle qu'insérée dans le territoire correspond à celle employée dans les logiciels actuels de systèmes d'information géographique (SIG).
- Le composant de vocabulaire topologique décrit les relations spatiales entre objets : *égal, disjoint, contient, intersecte, touche, à l'intérieur de, recouvre*. Ces relations peuvent être exprimées selon 3 conceptions topologiques usuelles : les relations topologiques simples, les relations topologiques d'Egenhofer (Egenhofer et Herring, 1990) pour les régions complexes (régions définies par une frontière et un intérieur) et les relations selon le modèle RCC8 (Cohn et al., 1997).
- Le composant géométrie décrit d'une part la géométrie des objets spatiaux sous la forme d'une chaîne de caractères, exprimée dans un format (WKT ou GML) et dans un système de coordonnées spatiales définis. D'autre part, il décrit les propriétés liées à la géométrie, parmi lesquelles on peut citer : la façon d'encoder les coordonnées géométrique sous forme d'une chaîne de caractères (*serialization*) et la version de cet encodage, la dimension des coordonnées (ex : 2D, 3D) et la relation topologique entre éléments.
- Trois composants sont relatifs aux requêtes sur les données géographiques exprimées en RDF.

Une autre approche est la norme ISO 14825:2011, Geographic Data Files (GDF) (ISO/Technical Committee 204, 2011). Elle définit les modèles de données et les formats d'encodage appliqués aux systèmes de transports intelligents. Elle a été créée en particulier pour les systèmes routiers. Le vocabulaire définit une série de termes généraux au domaine de la géomatique (*feature, attribut, jeu de données, couche, relation...*), des termes géométrique (point, ligne, surface, côté, nœud...) et des termes géodésiques (géoïde,

système de référence, hauteur, projection cartographique...) pour la localisation géographique.

Enfin, la base de données GeoNames (GeoNames, 2014) est un catalogue de 10 millions de noms de lieux dans le monde, disponible sous licence Creative Commons. Le fait qu'elle soit libre et la diversité des sources sur lesquelles elle s'appuie en font une référence. Chaque lieu contenu dans la base est caractérisé par : une catégorie parmi neuf existantes, un nom traduit en plusieurs langues, des coordonnées géographiques (x, y, z) et d'autres propriétés suivant sa catégorie d'appartenance. Les neuf catégories de lieux sont : les unités administratives, les villes, les lieux surfaciques (parc, base militaire, réserve, etc.), les infrastructures de transport, les bâtiments, les objets liés à l'eau (cours d'eau, marais, puits...), les objets géologiques (montagne, delta, île...), les objets sous-marins, les types de végétation.

Parmi les ontologies décrivant des objets spatiaux, nous pouvons également citer l'ontologie DBpedia, qui instancie les classes et les objets du site Wikipedia. Elle se présente donc comme une source potentielle de concepts et de noms de lieux géographiques, riche et standardisée.

3.4.2. Ontologies temporelles

Plusieurs modèles ont été développés pour référencer les événements dans le temps. Nous allons en explorer trois : le standard ISO 19108, l'ontologie OWL-Time et la Timeline Ontology.

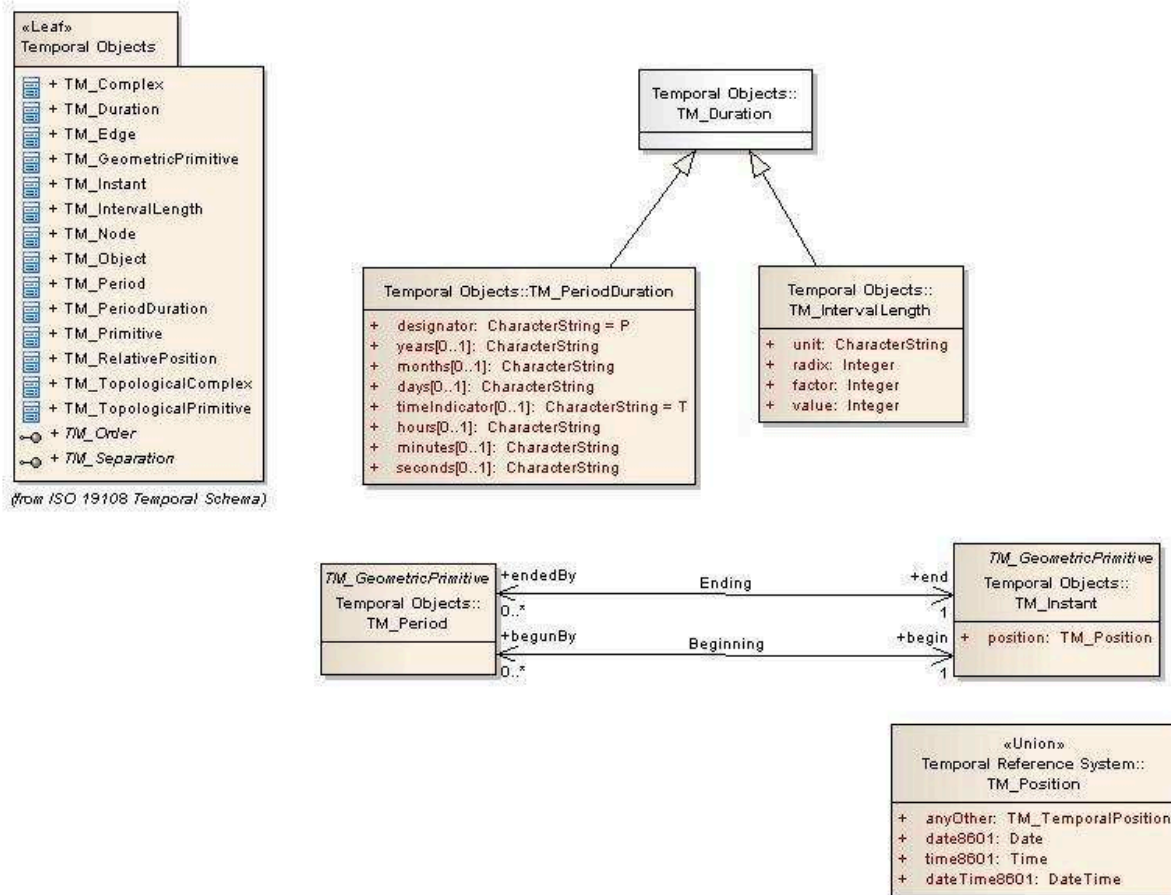


Figure 2.7. Modèle des concepts du standard ISO 19108 (Eurocontrol, 2012)

Le standard ISO 19108 (ISO, 2002) est le modèle le plus simple parmi les trois. Il décrit les concepts de base pour exprimer les caractéristiques temporelles de l'information géographique (Figure 2.7). Les concepts clés sont : *l'instant* (une primitive de dimension 0 qui représente une position dans le temps), la *période* (primitive à une dimension qui représente une étendue dans le temps) et la *durée*, spécifiée en deux sous-types : la *longueur d'intervalle*, exprimée par une valeur et une unité (ex : 5 min, 2 ans), et la *durée de période*, exprimée de façon plus systématique en année, mois, jours, heures, minutes et secondes. Une période est définie par un instant de début et un instant de fin. Les références temporelles se localisent dans un système de référence temporel.

L'ontologie OWL Time (W3C, 2006), spécification du W3C²⁸, est souvent désignée comme l'ontologie de référence pour décrire les temporalités. Cependant, le W3C indique que cette ontologie est obsolète car dépassée par les avancées techniques plus récentes (W3C, 2015). Elle reste aujourd'hui encore fréquemment utilisée dans la littérature. Nous choisissons donc

²⁸ W3C : World Wide Web Consortium

de la décrire ici.

Dans OWL-Time, les propriétés de localisation temporelle s'appliquent différemment sur les instants et les intervalles. Les instants et intervalles peuvent tous deux être reliés à une '*description de la date*' (*DateTimeDescription*). La description de la date contient 11 propriétés : *unitType* (granularité, unité de la date exprimée), *year* (année), *month* (mois), *week* (semaine), *dayOfWeek* (jour de la semaine), *dayOfYear* (jour de l'année), *hour* (heure), *minute*, *second* et *timeZone*. La différence est qu'un intervalle est relié à la description de la date par la relation *hasDateTimeInterval*, tandis qu'un instant est relié à la description de la date par la relation *inDateTime*.

La propriété pour exprimer la durée d'un intervalle est *DurationDescription* qui a 8 sous-types de propriétés : *years*, *months*, *weeks*, *days*, *hours*, *minutes*, *seconds*. D'autres propriétés permettent de décrire le début et la fin d'un intervalle : *hasBeginning* et *hasEnd*. Dans OWL-Time, la date « année 2006 », considérée comme un intervalle, pourra être définie de deux façons : soit par un intervalle qui a une *DateTimeDescription* avec pour *unitType* « year » et pour *year* la valeur « 2006 », soit par un intervalle qui a la propriété *hasBeginning* avec comme valeur « 1^{er} Janvier 2006 » et par la propriété *DurationDescription* qui a un *year* égal à « 1 ».

La Timeline Ontology (Raimond et Abdallah, 2007b) reprend certains des concepts de l'ontologie OWL-Time et l'enrichit par le concept de *ligne de temps* (timeline). La ligne de temps désigne un système de référencement temporel. Elle peut être *continue* (comme le temps que nous vivons), *discrète* (subdivisée en portions) ou *abstraite* (faisant référence à un temps propre à l'objet d'étude, comme le minutage dans une vidéo). L'échelle de temps physique constitue un sous-type de ligne de temps, qui représente le temps universel (UTC).

L'ontologie définit également les deux concepts clés d'*instant* et d'*intervalle*, qui sont localisables sur la ligne de temps selon un ou plusieurs *systèmes de coordonnées* temporelles. Selon l'échelle de temps dans laquelle ils s'insèrent, les instants et intervalles peuvent être *discrets*, *abstrait* ou *universels*. Ils sont reliés à une ligne de temps par la propriété *onTimeLine*.

Les instants et intervalles sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- une *date*, formulée par une propriété parmi 5 possibles (*atDate*, *atDateTime*, *atYear*, *atYearMonth*, *atDuration* – cette dernière représente une date imprécise qui est incluse dans un intervalle, elle signifie donc : « pendant la période ») ; la valeur associée par la propriété choisie représente une date unique si elle caractérise un instant ou l'ensemble de la période couverte si elle caractérise un intervalle (ex : « l'année 2016 »),
- si on veut spécifier une date de début et de fin d'un intervalle, il faudra utiliser respectivement les propriétés *commence le* (*start*, *beginsAtDateTime*, *beginsAtDuration*) et *finit* (*end*, *endsAtDateTime*, *endsAtDuration*),

- et la *durée* d'un intervalle (duration).

Parmi ces trois exemples, la Timeline Ontology est la plus récente et semble la plus complète. Tout en l'enrichissant, elle repose sur la base d'OWL-Time, ce qui peut faciliter son alignement avec les nombreuses ontologies utilisant ce système de référencement temporel.

3.5. Limites des ontologies existantes

Les ontologies existantes sur le système ferroviaire, les risques naturels et leurs impacts introduisent de nombreux concepts qui peuvent être réutilisés tels quels pour notre modèle : le concept de haut niveau d'événement, la distinction « risque / phénomène / événement », les relations entre composants d'une infrastructure, les dommages ou encore les effets dominos. L'étape suivante consiste à aligner les différents modèles sur la base de leurs concepts communs afin de produire une ontologie qui décrit les interactions complexes entre ces systèmes.

Parmi les ontologies que nous avons trouvées dans la littérature, il semble qu'il n'existe pas d'ontologie de domaine qui décrive les types d'impacts spécifiques des événements issus de risque naturels sur une infrastructure de transports. Si plusieurs ontologies décrivent bien la gestion de crise et l'organisation des acteurs (partie que nous n'avons pas explorées dans le corps de ce manuscrit), nous n'avons en revanche pas trouvé d'ontologie qui décrive la période post-crise, par exemple l'étape de travaux sur l'infrastructure, l'adaptation des circulations en situation perturbée ou les événements de la période jusqu'au retour à la normale des circulations. Cette description de la période post-crise pourrait être utile pour analyser les événements a posteriori, notamment pour évaluer leur coût financier. Enfin, pour décrire les impacts d'une inondation sur le système ferroviaire, il semble approprié de considérer ce système à un niveau de détail meso (ex : distinguant les composants de la voie ferrée : rail, traverse, ballast, etc.). Or, les ontologies décrivant l'ensemble du système ferroviaire restent à un niveau macro (ex : niveau « voie ferrée », sans distinguer ses composants), par exemple la RDO. L'ontologie RaCoOn est prometteuse mais le projet est toujours en cours et l'ontologie n'est pas encore publiée²⁹.

Les concepts manquants à notre thématique sont introduits dans l'ontologie que nous proposons, nommée IDISFER.

4. L'ontologie IDISFER

Le but de l'ontologie IDISFER (qui décrit les *Impacts des Inondations sur le Système Ferroviaire*) est de stocker l'information sur les inondations historiques de manière

²⁹ Vérification réalisée le 19 février 2017.

structurée et de pouvoir interroger cette information à partir de l'outil de géovisualisation. IDISFER se positionne comme un support de retour d'expérience couvrant l'ensemble des domaines métier du système ferroviaire, en modélisant le récit des inondations et de leurs impacts sur ce système. Le modèle conceptuel intègre :

- la description des objets du système ferroviaire,
- les phénomènes naturels intervenant dans une inondation,
- la typologie des impacts de ces phénomènes sur les objets ferroviaires,
- les mesures de réaction engagées par le système pour réagir.

Il décrit également les effets dominos liant ces trois derniers types d'événements.

4.1. Méthode de construction de l'ontologie

Ushold et Gruninger (1996) ont proposé une méthodologie de construction d'ontologie en cinq étapes :

- a) Définir l'usage futur qui sera fait de l'ontologie
- b) Identifier les concepts et relations de l'ontologie et les retranscrire dans un formalisme,
- c) Intégrer les ontologies existantes,
- d) Evaluer l'ontologie,
- e) Documenter l'ontologie.

Ces étapes ont été suivies lors du développement d'IDISFER.

L'usage souhaité de l'ontologie est de formaliser le récit des inondations historiques ayant impacté le système ferroviaire, dans le but d'alimenter en données un outil de visualisation de ces récits d'inondations. Les enjeux et finalités d'utiliser les informations sur les inondations historiques pour les experts du ferroviaire ont été détaillées dans le chapitre I.

La construction d'une ontologie suit bien souvent un processus itératif d'ajustements empiriques entre la connaissance fournie par les experts du domaine, l'alignement sur les formalisations existant dans la littérature et la confrontation aux données réelles issues de cas d'études (Tutcher et al., 2015, p. 9). Les concepts et les relations intégrés dans IDISFER ont été identifiés selon trois modalités :

- tout d'abord dans l'état de l'art des ontologies du domaine,
- dans la littérature technique du ferroviaire et
- par l'observation au cours des réunions de travail, notamment durant une réunion d'intelligence collective multi-métier.

La réunion d'intelligence collective citée en dernier point a utilisé le format du *World Café*³⁰. Cette session d'1h30 a permis de construire une vue d'ensemble des composants du système

³⁰ Pour plus d'informations sur la méthode d'intelligence collective du « World Café », vous pouvez consulter : <http://www.integralvision.fr/methodes-integrales/world-cafe/world-cafe.html> (accès le 05/01/2017)

ferroviaire sous la forme d'un arbre de concepts, aisément intégrable dans l'ontologie finale. Au cours de cette session, les participants, possédant des expertises métier variées, étaient répartis en groupes de 3 à 5 personnes et alimentaient successivement quatre types de schémas, chacun décrivant une partie différente du système ferroviaire. Un exemple de schéma ainsi obtenu, après l'alimentation par 4 groupes de participants, est représenté sur la Figure 2.8. En plus de favoriser la collaboration entre plusieurs métiers, cet exercice a permis de définir le niveau de détail utile aux experts dans la description du système ferroviaire confronté aux inondations.

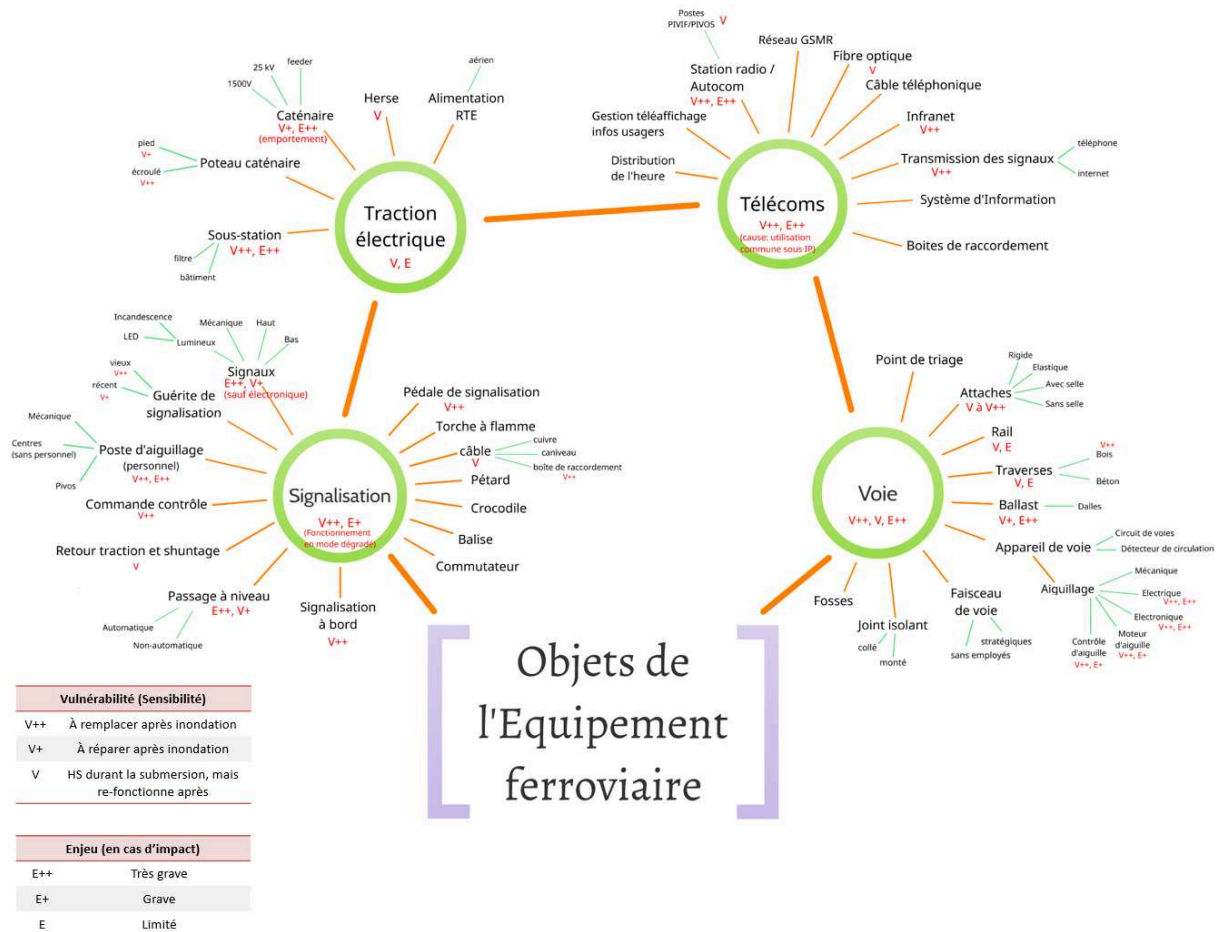


Figure 2.8. Schéma décrivant les objets de l'équipement ferroviaire, obtenu grâce à la collaboration entre experts métier

L'ontologie finale a été rédigée en RDF/OWL à l'aide du logiciel Protégé 4.3³¹. Elle a été évaluée en instanciant deux inondations parmi notre jeu d'études : l'inondation d'octobre 1940 sur la zone de la vallée du Tech et l'inondation de 2001 dans la Somme. Le traitement d'exemples historiques concrets a permis de compléter les effets dominos susceptibles de se produire entre plusieurs phénomènes naturels et entre plusieurs incidents. L'ontologie a finalement été documentée, traduite en anglais et une première version finalisée a été

³¹ Source : <http://protege.stanford.edu/>

diffusée sous licence CC-BY-SA sur internet³².

4.2. Structure générale de l'ontologie IDISFER

IDISFER est constituée d'un jeu de sous-ontologies de domaines. Elle contient :

- une ontologie qui décrit le système ferroviaire,
- une ontologie sur les phénomènes naturels en jeu dans une inondation,
- une ontologie qui décrit les incidents provoqués par les inondations sur le ferroviaire (en d'autres termes, qui décrit l'interaction entre inondations et système ferroviaire),
- une ontologie sur les actions de gestion pour réagir aux évènements et rétablir le système dans un état stable.

L'organisation générale de l'ontologie est présentée sur la Figure 2.9 : en partant du coin supérieur gauche du schéma, un *phénomène naturel* peut provoquer un *incident*, ou dommage. Les incidents ont été subdivisés en deux catégories, suivant la typologie utilisée en interne dans l'entreprise : les *dommages de premier ordre* (ou « incidents origines » dans le langage de l'entreprise) sont ceux qui peuvent être causés par un facteur extérieur au système ferroviaire, tandis que les *dommages de second ordre* (ou « incidents induits ») découlent uniquement de dommages de premier ordre survenus au préalable. Les incidents ont un impact sur les *objets du système ferroviaire*, eux-mêmes subdivisés en quatre catégories détaillées plus loin dans cette section. Les incidents engendrent également des *perturbations* des circulations (seules les « circulations » sont concernées par les « perturbations », d'où leur mise en exergue sur la Figure 2.9). Les perturbations de circulations induisent la mise en place de *mesures de réaction*, qui agissent sur le système ferroviaire et peuvent elles-mêmes engendrer d'autres perturbations de circulations (ex : limitation des vitesses de circulation le temps de réaliser des travaux).

Les phénomènes naturels, incidents, perturbations et réactions sont tous des sous-classes d'*événements*. Chaque événement est caractérisé par une *entité temporelle*, ou date, qui peut être un instant ou un intervalle, et par une *localisation*, qui peut être référencée linéairement ou par des coordonnées dans un système de projection.

La section suivante présente les 4 sous-ontologies qui composent le modèle.

³² L'ontologie IDISFER est téléchargeable sur : <http://lig-membres.imag.fr/saintmar/ontology/IDISFER.html>

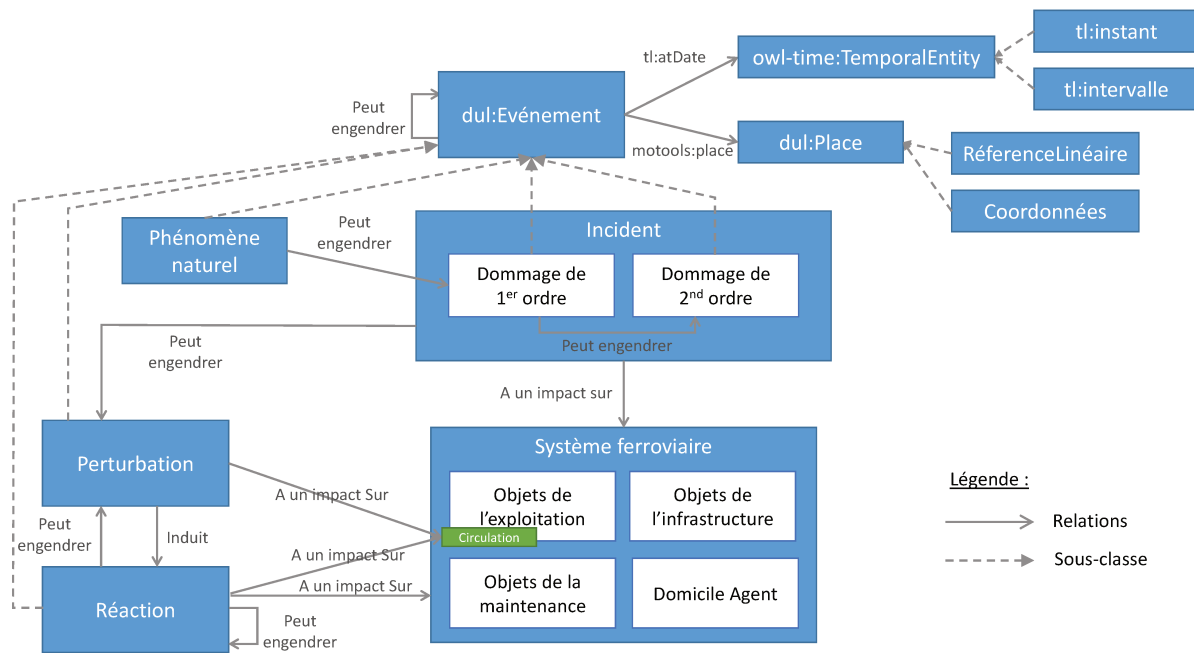


Figure 2.9. Modèle simplifié de l'ontologie IDISFER

4.3. Détail des ontologies d'IDISFER

4.3.1. Ontologie relative au système ferroviaire

L'ontologie décrivant le système ferroviaire est composée de quatre sous-ensembles : l'infrastructure de la voie (voie, ouvrages d'art, signalisation...), l'infrastructure de maintenance (ateliers de maintenance...), l'exploitation ferroviaire (circulations, trains, gares...) et le système humain. Tous ces sous-systèmes sont susceptibles d'être impactés par les inondations sous des formes différentes : endommagement ou destruction pour les infrastructures, perturbation pour les circulations. Le quatrième sous-système vise à illustrer un aspect organisationnel relatif aux agents qui sont chargés de la maintenance ou des circulations. Plusieurs exemples historiques d'inondations font état de cas où, bien que l'infrastructure elle-même n'ait pas été touchée par l'inondation, les circulations de train étaient quand même perturbées à cause de la coupure des axes routiers empruntés par les agents dans leurs trajets domicile-travail.

Les quatre parties de l'ontologie relatives au système ferroviaire sont détaillées dans l'Annexe 2.

4.3.2. Ontologie relative aux phénomènes d'inondation

La majorité des concepts ayant trait aux phénomènes naturels a été reprise de l'ontologie environnementale de haut-niveau SWEET. Les phénomènes naturels ajoutés par IDISFER sont l'embâcle, la fonte des neiges, la marée et les phénomènes d'inondation ajoutés sont le débordement (de cours d'eau ou de lac), la remontée de nappe phréatique, le ruissellement

intense et la submersion marine, issus de la typologie de Lang et Cœur (2014). Les phénomènes naturels peuvent être liés entre eux par des effets dominos : par exemple, la pluie peut engendrer le débordement d'un cours d'eau ou une remontée de nappe phréatique, ou encore la combinaison d'un vent fort et de la marée haute peuvent engendrer une submersion marine (Figure 2.10).

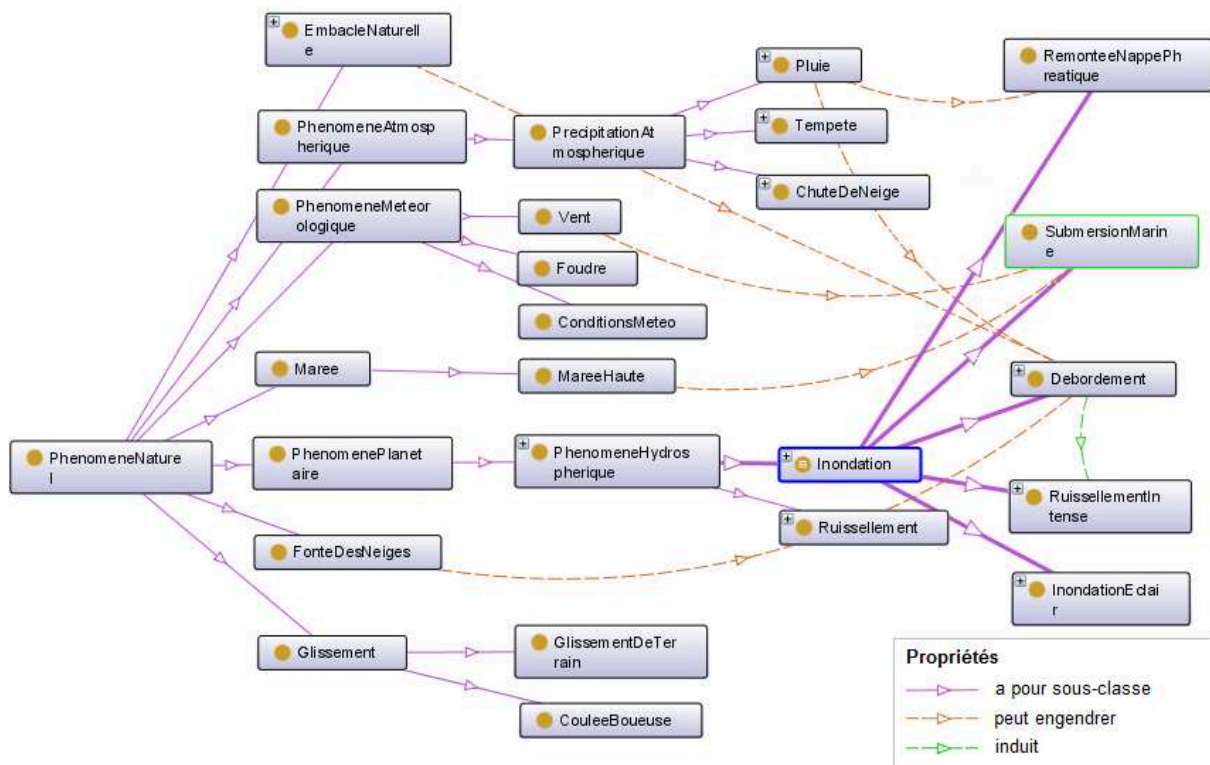


Figure 2.10. Concepts extraits de l'ontologie relative aux phénomènes naturels

4.3.3. Ontologie relative aux incidents ferroviaires causés par les inondations

Dans le vocabulaire utilisé dans l'entreprise SNCF, les dommages survenant sur le système ferroviaire sont dénommés des *incidents*. C'est ce terme qui a été inclus dans l'ontologie IDISFER. Les incidents ferroviaires ont été classés en deux catégories, conformément à la nomenclature existant actuellement dans l'entreprise : les *incidents origines* sont des incidents qui peuvent être causés par des facteurs hydro-climatiques (ex : le ruissellement engendre l'érosion d'un remblai), les *incidents induits* sont causés par des incidents origines (ex : le gonflement d'un talus peut engendrer une déformation linéaire de la voie) et jamais directement par des phénomènes naturels.

L'enjeu principal de cette ontologie est de décrire les relations de causalité entre événements. Elles peuvent être de deux-types : la relation *induit* lie deux événements lorsque, si le premier se produit, alors le second se produit obligatoirement ; la relation *peutEngendrer* signale une relation possible mais pas systématique. La relation *aUnImpactSur* relie un incident aux composants du système ferroviaire qu'il est susceptible

d'impacter. Le recensement de toutes les relations *aUnImpactSur* peut permettre, par inférences dans l'ontologie, de dresser une typologie des événements selon la catégorie d'objets qu'ils impactent : incidents sur les ouvrages d'art, incidents sur la voie, incidents sur les gares, etc.

Un extrait de cette ontologie figurant les effets dominos possibles entre des incidents origines et induits est présenté sur la Figure 2.11. Cette partie de l'ontologie compte actuellement 35 effets dominos entre incidents (31 relations *peutEngendrer* et 4 relations *induit*).

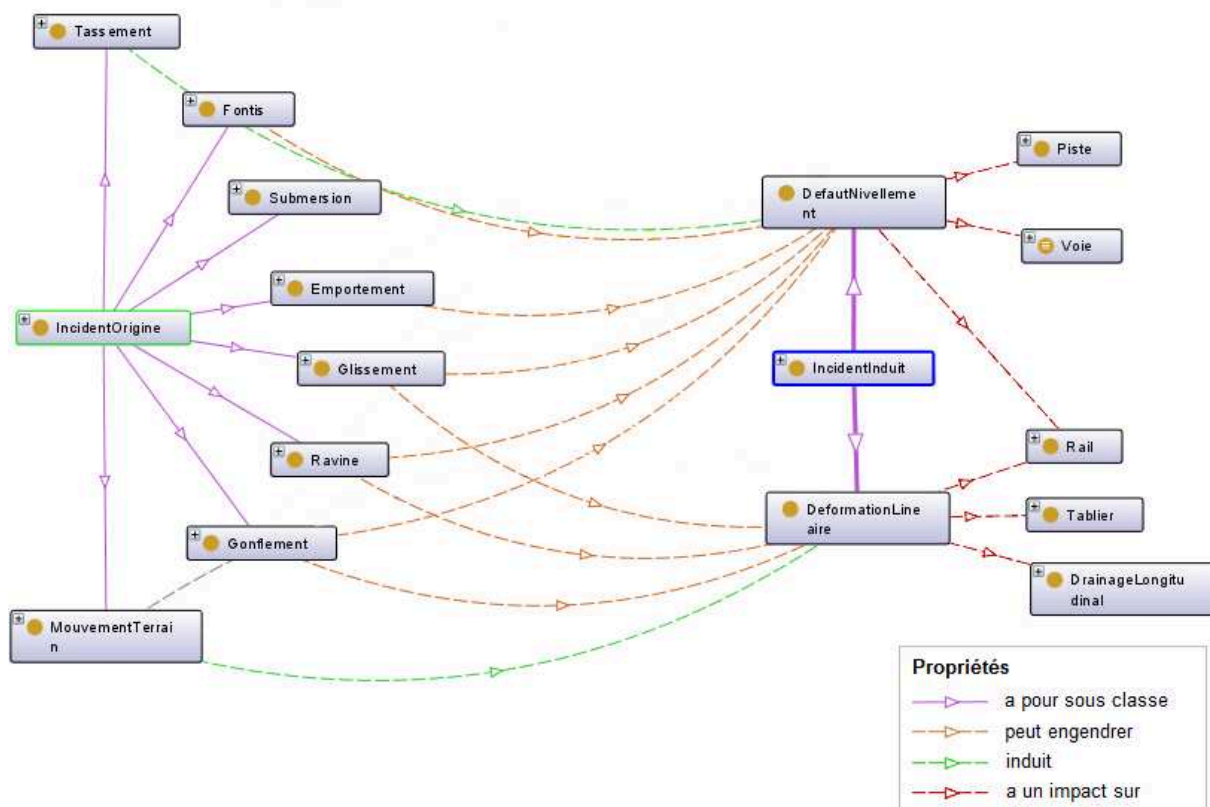


Figure 2.11. Extrait de l'ontologie relative aux incidents, illustrant les relations entre incidents origines et incidents induits

4.3.4. Ontologie relative aux réactions face aux perturbations

Les phénomènes naturels peuvent donc engendrer des incidents qui peuvent eux-mêmes engendrer des perturbations des circulations de trains. Les perturbations peuvent être de trois types :

- défaut de sécurité : menace envers la sécurité du personnel, des voyageurs ou des marchandises convoyées ;
- défaut de régularité : écart par rapport à l'horaire théorique prévu pour la circulation d'un train ;

- accident : dommages matériels à un train résultant d'un environnement de circulation anormal.

L'apparition d'un défaut de sécurité ou d'un accident *induit* la mise en place de mesures de réaction pour pouvoir rétablir le système ferroviaire dans son état d'origine. Par exemple, un remblai menace d'être emporté par les eaux tumultueuses du fleuve qui est sorti de son lit. La sécurité des voyageurs et du personnel naviguant est menacée, les circulations sont donc interrompues sur la ligne. On devine ici que la mise en place de mesures de réaction (telle que l'interruption des circulations) peut elle-même engendrer un défaut de régularité. Les relations entre ces événements sont présentées sur la Figure 2.12.

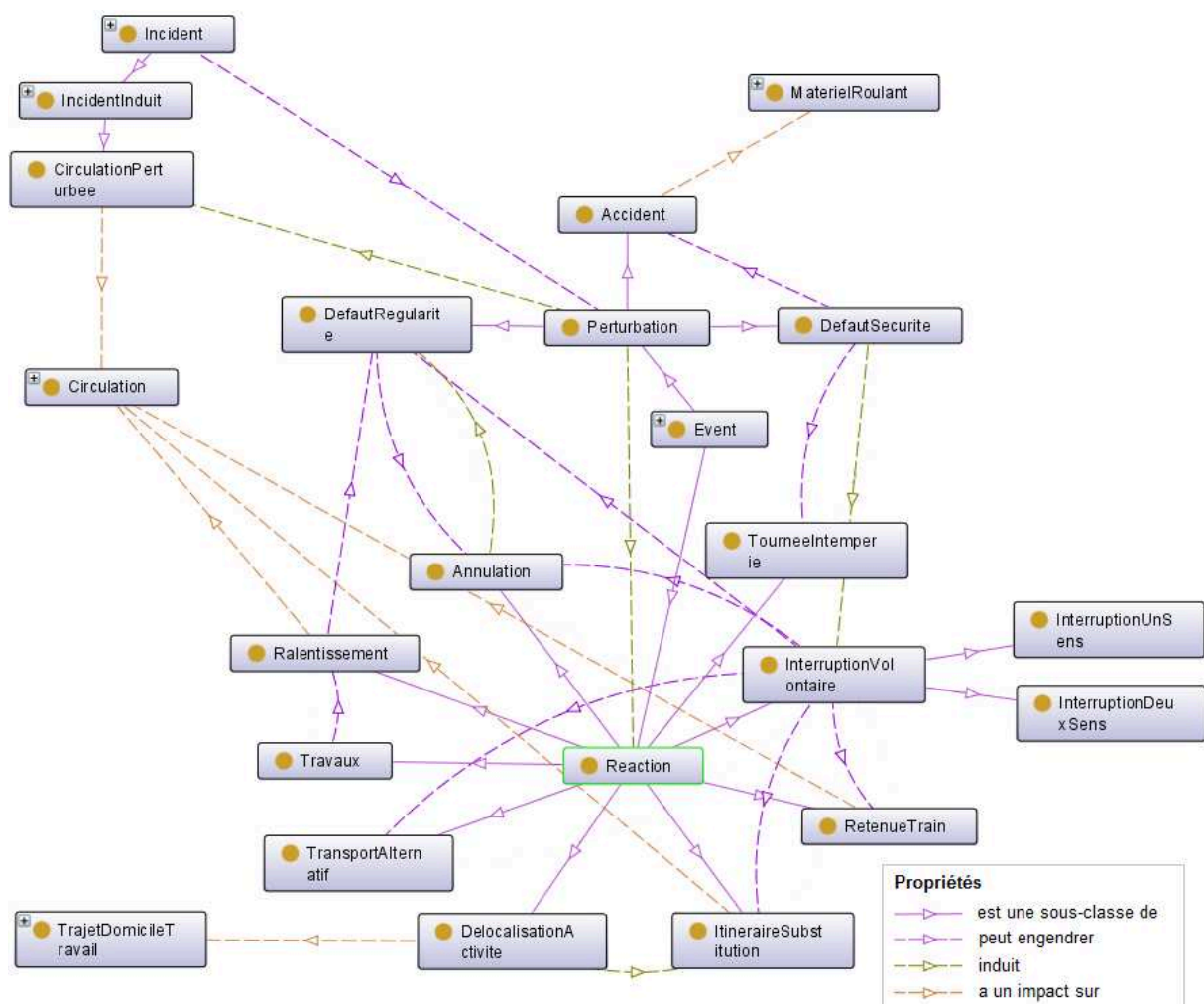


Figure 2.12. Ontologie relative aux perturbations ferroviaires et aux mesures de réaction mises en place

Les mesures de réaction peuvent consister en :

- une action sur les circulations : ralentissement, interruption, annulation ou retenue de trains en gare, mise en place d'itinéraires ou de modes de transports de substitution dans le cas des interruptions de longue durée,
- une action sur l'infrastructure, dans notre cas des travaux de régénération ou

- une action sur le système humain : délocalisation de l'activité des agents lorsqu'ils ne peuvent plus rejoindre leur lieu de travail habituel.

Parmi les mesures de réaction, on pourrait également décrire les dispositifs de gestion de crise : lancement de tournée intempérie, communication entre acteurs, ouverture de cellule de crise, etc. La thèse n'a pas contribué à la description de cette partie qui nécessiterait une étude à part entière, notamment pour décrire les relations entre les acteurs des différentes entités ferroviaires et avec les acteurs institutionnels, qui forment un système complexe. Une description du système de gestion de crise peut être trouvée dans la littérature (ex: Bénaben et al., 2008).

4.3.5. Propriétés associées aux classes

Les phénomènes naturels, les incidents et les mesures de réaction sont tous considérés comme des *événements* au sens de l'ontologie LOD (Troncy et al., 2010). Des propriétés sont associées à chaque événement :

- une localisation spatiale (lieux) exprimée soit par référencement linéaire sur une ligne, par la propriété d'objets *seProduitSur* et les propriétés attributaires *aPk*, *aPkDebut* et *aPkFin*, soit par le rattachement à un objet dans Geonames (ville, cours d'eau, etc.) ;
- une localisation temporelle (dates), en suivant la nomenclature de la Timeline Ontology (Raimond et Abdallah, 2007b) ;
- une source documentaire, liée par la propriété *aSourceDocumentaire* ;
- éventuellement des mesures numériques (ex : diamètre d'un fontis, vitesse d'un ralentissement).

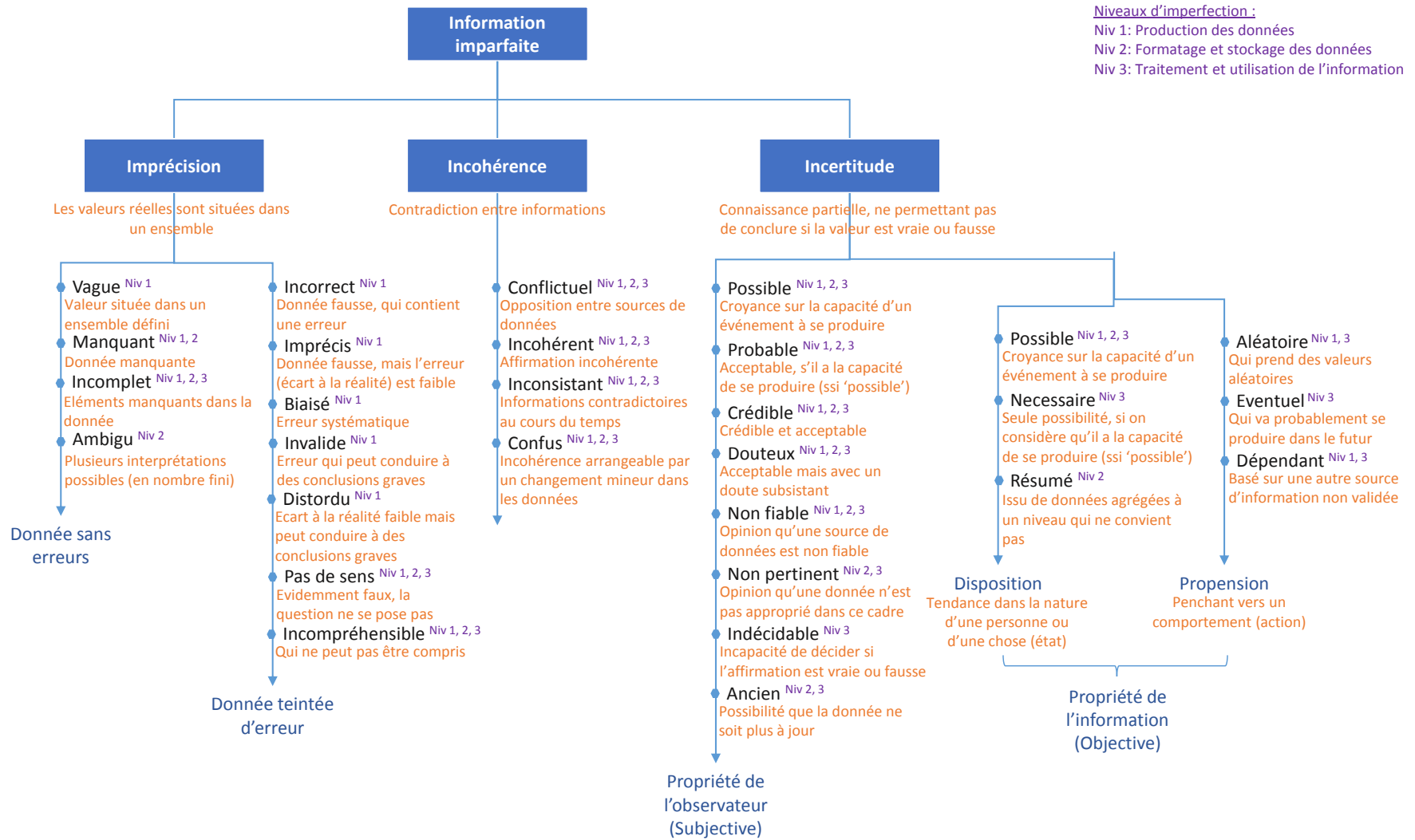
Ces propriétés ne sont pas obligatoires : on peut par exemple connaître la ligne et le pk auquel s'est produit un événement historique, mais pas sa date.

Lors du peuplement de l'ontologie IDISFER, lorsque les dates ou les localisations des événements étaient imparfaites ou manquantes, des dates et localisations possibles ont été déduites à partir du contexte des événements. Dans ce cas, une propriété *aTypeImperfection* a été associée aux localisations spatiales et temporelles, pointant vers un terme qui qualifie le type d'imperfection rencontré (ex : « 10 octobre 1940 *aTypeImperfection* incertain »). Ces propriétés assurent la traçabilité des problèmes de qualité existant dans les données et de leur nature.

Les termes qualifiant l'imperfection ont été sélectionnés à partir d'un état de l'art des typologies d'imperfections produites dans le domaine des sciences de l'information géographique. La typologie des données imparfaites est présentée sur la Figure 2.13. L'état de l'art et le travail de synthèse que nous avons menés, qui ont permis d'aboutir à cette typologie, sont présentés dans l'Annexe 3.

La typologie a ensuite été intégrée à l'ontologie sous forme de valeurs de destination possibles de la propriété *aTypeImperfection*.

Figure 2.13: Typologie des imperfections des données spatio-temporelles



Conclusion de la Partie 2

L'ontologie IDISFER modélise le récit d'une inondation en décrivant la succession des événements issus de risques et leurs relations de causalité. Elle compte 170 classes de concepts, 12 types de relations et 34 propriétés associables aux données. Elle présente l'originalité de lier des ontologies de plusieurs domaines, pour pouvoir retracer les impacts des inondations :

- une ontologie du système ferroviaire,
- une ontologie des phénomènes de risques naturels impliqués dans les inondations,
- une ontologie des impacts des inondations sur l'infrastructure et l'exploitation ferroviaire et
- une ontologie des mesures de réaction aux dommages spécifiques à un réseau de transport.

Destinée à stocker des données spatio-temporelles historiques, elle présente également deux originalités, par rapport aux autres ontologies dans le domaine des risques naturels :

- elle décrit l'ancrage spatial et temporel des événements plus formellement et avec plus de complexité que des propriétés simplement associées aux événements, grâce à l'appui sur des ontologies spatiales et temporelles,
- elle décrit les imperfections susceptibles d'exister dans les données, grâce à l'intégration d'une typologie des imperfections existant dans les données spatio-temporelles.

Les récits d'événements issus d'inondations, formalisés par IDISFER, visent à être intégrés dans un outil cartographique de retour d'expérience. Comme nous l'avons évoqué en conclusion de la Partie 1, une géovisualisation dynamique des événements issus de risques pourrait permettre d'analyser les processus d'inondations historiques dans l'espace et dans le temps. Cependant, la cartographie des données historiques sur les risques n'est pas sans poser des questions concernant la lisibilité et la compréhension de la carte par les utilisateurs. Une représentation cartographique mal conçue risque de compromettre l'utilisabilité des informations.

Il semble donc important de déterminer quels sont les facteurs qui influencent la lisibilité des cartes. Notamment quelles règles de représentation cartographique peuvent s'adapter aux données spatio-temporelles ? Et quelles caractéristiques visuelles peuvent faciliter la perception et la compréhension par les utilisateurs ? La partie suivante dresse un état de l'art qui vise à explorer comment créer des cartes temporelles lisibles et efficaces du point de vue de la perception et de la compréhension par l'humain.

Partie 3

Représentations graphiques du
temps en géovisualisation :
comment créer des cartes
temporelles lisibles ?

Partie 3 : Etat de l'art : créer des cartes temporelles lisibles

La cartographie d'un récit d'inondation vise à retranscrire sur une carte les événements issus de risques, qui ont été préalablement formalisés par l'ontologie IDISFER (cf. section III.4). La carte des événements historiques s'adresse aux experts du système ferroviaire. Elle a pour objectif de fournir un retour d'expérience sur les processus impliqués dans les inondations, en décrivant notamment leurs impacts et la réaction des acteurs du système (cf. section I.3.3).

La visualisation cartographique de ces données est confrontée à deux enjeux : d'une part, la carte doit être efficace pour ses utilisateurs, c'est-à-dire leur permette d'atteindre leurs objectifs de lecture et, d'autre part, elle doit être utilisable, c'est-à-dire être adapté à leurs besoins et leurs compétences. Le mode de représentation sera dit « adapté » aux utilisateurs s'il remplit ces deux critères d'efficacité et d'utilisabilité.

Le choix d'un mode de représentation cartographique adapté n'est pas simple. Il est en effet confronté à plusieurs problématiques.

Premièrement, si, par nature, le format cartographique est très adapté pour communiquer la dimension spatiale des phénomènes, il est en revanche plus délicat d'y représenter des processus et des dynamiques temporelles. Par ailleurs, l'observation des données historiques nous montre que les événements issus d'inondation ne se répartissent pas de façon continue et homogène dans le temps mais qu'ils possèdent des caractéristiques temporelles spécifiques. Généralement, les événements surviennent en majorité pendant une période brève, couvrant les premiers jours de l'inondation, puis ils se raréfient et se dispersent sur le long-terme, comme l'illustre la Figure 3.1.

La visualisation cartographique du récit des événements devrait refléter ces temporalités pour permettre au lecteur de comprendre les dynamiques d'un événement et éventuellement de comparer les motifs temporels dessinés par les événements d'une inondation à l'autre. Ce constat mène à formuler plusieurs questions quant au choix d'un mode de représentation adapté : quelles sont les caractéristiques temporelles pouvant être associées aux données géo-historiques ? Et comment visualiser les différentes temporalités associées aux processus d'inondations, en tirant parti du potentiel des environnements de géovisualisation ?



Figure 3.1. Scalogramme du nombre d'événements survenus par jour, au cours de l'inondation des Vosges de 1947

Deuxièmement, l'analyse des besoins de nos utilisateurs (cf. section I.3.) a montré qu'il est important que la carte de récit d'inondations donne à voir la nature des phénomènes qui ont

impacté le territoire, leur ordre chronologique, mais aussi les relations de cause à effet qui lient ces phénomènes entre eux et qui contribuent à amplifier leurs impacts : les « effets dominos » (Provitolo, 2005).

Visualiser les effets dominos consisterait à figurer les relations temporelles et spatiales entre les événements, ce qui permettrait d'explicitier la cohérence logique dans le déroulement du récit. La deuxième problématique qui se pose est donc : comment donner à voir les effets dominos d'une façon lisible dans la carte ? Et comment permettre au lecteur de percevoir la cohérence du récit cartographié ?

Ces deux problématiques, liées aux propriétés temporelles des données, nous conduisent à étudier l'état de l'art en cartographie temporelle.

Par ailleurs, dans la section II.1.1.1., il a été évoqué que, pour être efficace, une carte doit suivre un certain nombre de règles de conception qui visent à garantir sa lisibilité et à faciliter sa compréhension. Les interrogations sur l'efficacité et la lisibilité des cartes amènent à s'intéresser aux mécanismes cognitifs qui guident la lecture, la perception, le traitement et la mémorisation des informations visuelles communiquées par les cartes. Certains modes de visualisation peuvent-ils favoriser la perception et la compréhension des utilisateurs ?

Le chapitre IV présente les paramètres qui influencent la lecture des cartes et des visualisations dynamiques par l'utilisateur. Les principes issus de la théorie de la communication et de la psychologie cognitive peuvent nous renseigner sur les mécanismes de perception des images et de lecture des cartes, de mémorisation des données et de construction de représentations mentales des informations cartographiées. L'application de ces principes dans le contexte cartographique nous permet de formuler des principes pour bâtir des représentations cartographiques efficaces.

Le chapitre V présente les concepts associés à la description du temps, puis un état de l'art des modes de visualisation adaptés à chaque paramètre temporel, dans la carte ou au sein d'environnements de géovisualisation. Le cas particulier de la représentation de récit sera également exploré, en s'inspirant des développements réalisés à la fois dans la science littéraire et en cartographie.

IV/ Adapter les cartes aux utilisateurs

La carte est un outil de communication d'information. Elle est toujours produite à destination d'un utilisateur, pour un objectif d'usage spécifique. La représentation cartographique doit s'adapter à ces deux paramètres, pour garantir son efficacité et sa lisibilité : par exemple, l'information perçue en premier doit être cohérente avec les objectifs de la carte (Bessadok et al., 2011), les couleurs doivent être fidèles aux objets du monde réel qu'elles représentent (Christophe, 2009),... Ces règles sont en fait des conséquences de la manière dont l'être humain perçoit et analyse son environnement, autrement dit des *mécanismes cognitifs* impliqués dans la lecture des images et des cartes.

La « cognition » fait référence aux mécanismes de la pensée sous toutes leurs formes, qu'ils soient déclenchés dans des traitements de l'information « simples », tels que la perception, ou mobilisés pour des traitements plus élaborés (ex. : raisonnement, mémoire, catégorisation, etc.) (Villanova-Oliver et Christophe, 2014). Depuis une vingtaine d'année, la science cartographique s'appuie sur des résultats et des méthodes issues des sciences cognitives pour améliorer l'efficacité des cartes.

En se conformant aux règles qui régissent les mécanismes automatiques de perception, les environnements de visualisation interactifs peuvent amplifier les capacités humaines à détecter des motifs, établir des liens et réaliser des inférences (Andrienko et al., 2010). Un premier volet consiste donc à étudier les mécanismes cognitifs impliqués dans la lecture de carte pour en dégager des principes de représentations graphiques efficaces.

Un second volet qui peut également apporter des éléments à la production cartographique, est la psychologie expérimentale. En cartographie, il existe une tradition d'obtenir des preuves empiriques de l'efficacité des représentations visuelles au moyen d'expérimentations durant lesquelles les participants utilisent différents types de cartes et de graphiques, afin de trouver les informations nécessaires pour répondre à certaines questions (Andrienko et al., 2010). Les protocoles expérimentaux en cartographie s'appuient notamment sur des méthodes et des formalismes issus de la psychologie expérimentale. La validation expérimentale des représentations cartographiques est ainsi devenue systématique et rigoureuse, rendant les propositions objectivement justifiées et plus généralisables.

Ce chapitre présente trois approches complémentaires pour placer l'utilisateur au centre de la production cartographique, afin d'élaborer des représentations qui lui soient adaptées. La première section introduit la théorie de la communication et son application dans le cadre de la cartographie. La carte est un média de communication et, en tant que tel, n'est pas exempte du point de vue de son créateur, ni d'interprétations de la part de l'utilisateur. Analyser la chaîne de transmission de cette information peut permettre de la maîtriser et de garantir le bon acheminement du message.

La seconde section aborde les principes de cognition touchant à la perception visuelle et à la compréhension. La façon dont ces principes peuvent influencer la conception des cartes, pour les adapter au lecteur et à ses objectifs, sera développée.

Enfin, la troisième section présente les méthodes d'évaluation expérimentale des cartes, qui confrontent les représentations cartographiques aux utilisateurs finaux. Ces méthodes permettent de définir si les représentations cartographiques élaborées sont réellement lisibles et efficaces pour les utilisateurs.

1. Théorie de la communication adaptée à la cartographie

La carte géographique donne à voir une ou plusieurs caractéristiques d'un espace. Son rôle est de transmettre une information, du concepteur de la carte vers le lecteur. Elle s'inscrit ainsi dans un système émetteur - récepteur. Selon la théorie de la communication (Shannon et Weaver, 1949), la chaîne de transmission d'une information contient cinq étapes (Figure 3.2) : le message conçu par une personne *source* est encodé via un *émetteur* qui le transforme en *signal*. Le signal se propage ensuite dans un *canal de diffusion*, puis est reçu et décodé par un *récepteur*, qui le retransforme en message intelligible pour le *destinataire*. Du bruit peut venir altérer le signal lors de sa diffusion de l'émetteur vers le récepteur.

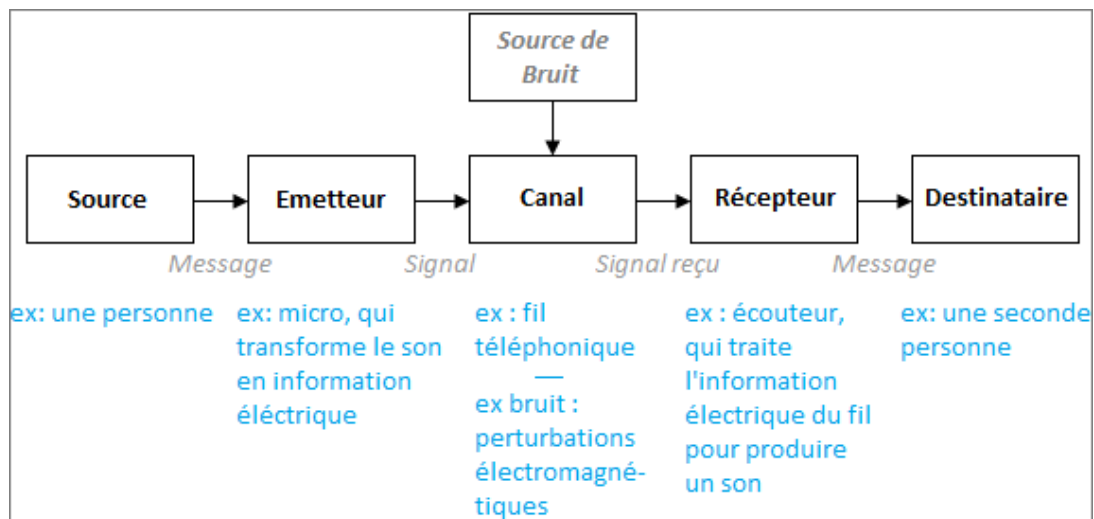


Figure 3.2. Chaîne de transmission de l'information dans la théorie de la communication (Shannon et Weaver, 1949)

Adapté à la lecture d'images, nous posons l'hypothèse que ce modèle peut aussi s'adapter à la cartographie : le message du cartographe est encodé dans la carte, au moyen de la sémiologie graphique. Il devient alors un signal visuel, qui est transmis à travers l'œil du lecteur, puis au cerveau qui le décode et le rend intelligible pour le destinataire. Cette formalisation révèle 3 étapes où la communication du message cartographique peut être altérée :

- encodage du message, du cartographe (source) à la carte (émetteur) : si le message est mal encodé, par exemple si les règles de la cartographie ne sont pas respectées (cf. section II.1.1.), il sera transmis sous une mauvaise forme et donc a priori mal reçu,
- transmission du signal, de la carte (émetteur), à travers l'air (canal), jusqu'à l'œil (récepteur) : le message cartographique peut être bien conçu mais mal perçu par l'œil, notamment en cas de perturbations de l'environnement (ex : lumière artificielle modifiant les couleurs réfléchies par la carte) ou du récepteur (ex : troubles de la vision, presbytie, daltonisme),
- transmission du message, de l'œil (récepteur) au cerveau (destinataire) : le stimulus visuel, bien que correctement reçu par l'œil, peut ne pas être correctement intégré par le cerveau, ce qui peut être causé par exemple par un déficit de l'attention ou une surcharge cognitive (ces points seront développés dans la section IV.2.4).

Ce modèle de la communication, conçu dans un cadre d'ingénierie, ne reflète pas la dimension sociale de l'émetteur et du destinataire. Dans le cas de la conception d'un support de communication visuel, des filtres sont introduits à l'entrée et à la sortie de la chaîne de transmission par le cartographe et le lecteur. Ces deux acteurs reconstituent chacun leur propre modèle de la réalité du territoire physique cartographié, comme l'illustre le modèle de la Figure 3.3 (Muehrcke, 1978).

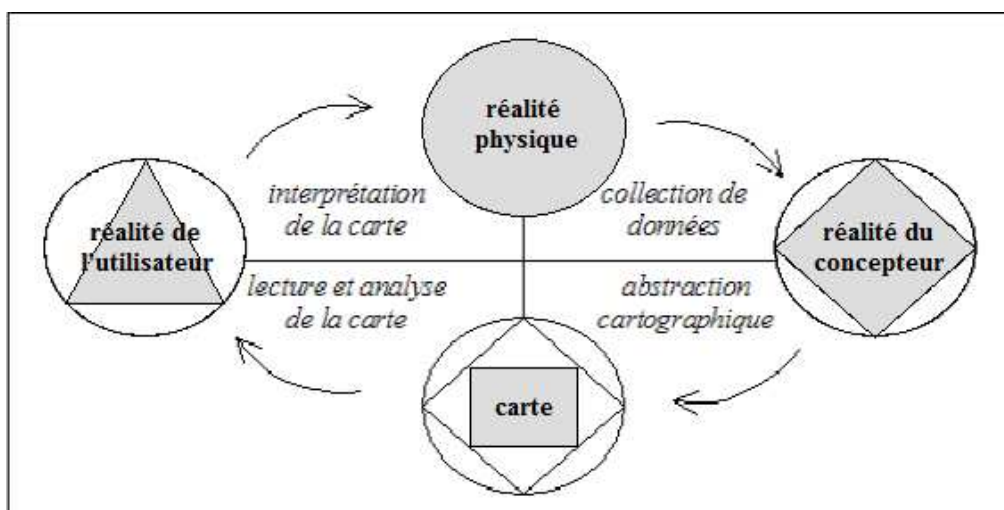


Figure 3.3. Modèle du message cartographique (Muehrcke, 1978, cité par Chesneau, 2006)

Du côté de la conception de la carte, un premier filtre existant résulte des choix du cartographe lorsqu'il retranscrit le territoire de façon simplifiée. Le message cartographié dépend de (Koláčný, 1969) :

- la perception qu'il a du territoire en question, par son vécu ou ses connaissances,
- de ses compétences techniques (maîtrise des outils de conception), scientifiques (connaissances des règles de cartographie) et artistiques (choix pertinents de sélection et de représentation d'information) et

- de sa capacité à anticiper l'impact qu'aura le message visuel sur le lecteur.

Notons que le choix des données sélectionnées et de leur représentation peut ne pas être seulement un choix du cartographe mais aussi une demande du client de la carte, selon ses objectifs (Cauvin et al., 2007). La demande du client, adressée au cartographe, ajoute une boucle de rétroaction dans la chaîne de transmission de l'information de la Figure 3.2, qui va du destinataire vers l'émetteur source : c'est la notion de *feedback* dans le domaine de la communication (Wiener, 1961).

A l'autre extrémité de la chaîne de transmission, le lecteur a lui aussi des caractéristiques qui filtrent le message reçu : une représentation mentale préalable du territoire figuré par la carte, qui peut différer de la conception qu'en a le cartographe et qui influencera sa lecture (Koláčný, 1969), des capacités de compréhension du système de symboles, de représentation spatiale et des capacités perceptives (Palka, 2015, p. 61).

La carte sera aussi perçue différemment en fonction de l'objectif du lecteur (Wood, 1993). Hake (1973) a identifié deux phases dans la lecture de carte : la recherche active, où le lecteur cherche à répondre à une question, et la perception passive, qui est une lecture de la carte sans but précis. Selon le modèle d'Hake, le lecteur alterne entre l'un et l'autre de ces modes au cours de la lecture. On peut poser l'hypothèse que l'attention du lecteur ne sera pas concentrée sur les mêmes informations lors de ces deux phases, puisque ses objectifs sont différents.

Au milieu de la chaîne de transmission, le support ou vecteur de communication choisi peut aussi avoir une influence sur la lecture (Koláčný, 1969). Par exemple, l'information ne sera pas lue, donc perçue, de la même façon selon qu'elle est communiquée sur une carte papier ou dans une carte informatique interactive.

L'identification des étapes de la chaîne de communication cartographique permet d'identifier les filtres susceptibles d'altérer la réception du message. Il peut s'agir de filtres physiques (symbologie non lisible, conditions environnementales défavorables) ou sociaux, introduits soit par le cartographe (conception du territoire, expertise cartographique), soit par le lecteur (connaissances préalables, intérêts, objectifs). Le cartographe doit donc être attentif à ce que ces points ne constituent pas des blocages, ce qui peut être réalisé au moyen d'enquêtes de terrain, d'interviews auprès des utilisateurs et d'une réflexion sur ses productions propres.

D'autres modèles de communication peuvent être appliqués à la cartographie et enrichir la réflexion sur l'adaptation des représentations aux utilisateurs. On emploie souvent le terme de « langage cartographique », dans une analogie au langage écrit ou parlé. Il est donc possible de rapprocher les fonctions de communication de la carte des fonctions du langage telles que formalisées par Jakobson (1960), qui sont reproduites sur la Figure 3.4. Dans le modèle de Jakobson, la chaîne de communication implique un destinateur (ou émetteur) qui envoie le message vers un destinataire, qui le reçoit. Pour être opérant, le message doit

renvoyer à son *contexte*, qui doit être compréhensible par le destinataire. Le message requiert un *code* commun au destinataire et au destinataire, tel qu'une langue partagée. La transmission du message implique un *contact* entre l'émetteur et le destinataire, connexion physique ou psychologique, qui permet d'établir, puis de maintenir la communication.

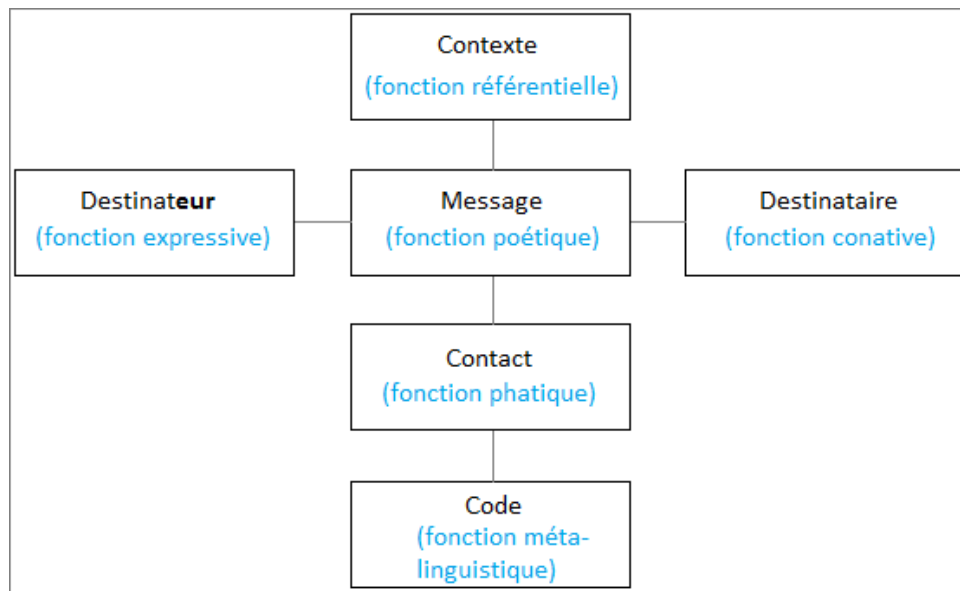


Figure 3.4. Les six fonctions du langage (Jakobson, 1960)

A chacun des objets du modèle de Jakobson est associée une fonction de communication. L'une de ces fonctions peut constituer l'objet même du message transmis ou elles peuvent co-exister et le contextualiser. Le modèle fournit une grille d'analyse pour décrypter les fonctions du langage :

- une fonction expressive : utilisée par l'émetteur pour informer le destinataire sur ses pensées, son attitude ou ses émotions par rapport au sujet abordé,
- une fonction conative : utilisée pour inciter le destinataire à agir dans une direction voulue par l'émetteur,
- une fonction référentielle : utilisée pour renvoyer au monde extérieur, situer le message dans un contexte,
- une fonction phatique : utilisée pour établir et maintenir la communication ou pour vérifier le passage physique du message,
- une fonction métalinguistique : utilisée pour définir un code, un mode d'emploi, et
- une fonction poétique : utilisée pour insister sur la forme du message, sa dimension esthétique.

Dans le contexte de la cartographie, il nous semble que ces fonctions sont directement retranscrites dans le contenu de la carte et dans ses éléments annexes. Par exemple, le cartographe peut informer sur le sérieux de sa production en citant les sources des données (fonction expressive), rendre certains objets géographiques saillants visuellement pour orienter la lecture vers eux (conative), ajouter un carton de localisation à la carte

(référentielle), utiliser un titre et une sémiologie attractifs (phatique), utiliser des symboles iconiques connus et ajouter une légende (métalinguistique), utiliser des couleurs harmonieuses ou des textures artistiques (poétique).

La combinaison de ces six fonctions du langage au sein de l'environnement cartographique peut favoriser et renforcer la transmission du message. L'usage de ces fonctions semble être une condition nécessaire, quoique non suffisante, à l'établissement et au maintien de la communication cartographique, donc à l'efficacité de la carte.

L'étude des mécanismes de transmission d'information met donc en évidence le rôle de la dimension sociale dans la transmission du message cartographique : l'émetteur introduit des indices dans la visualisation qui visent à établir la communication et à transmettre le message de façon intelligible, le destinataire perçoit, décode et interprète le système de symbole pour forger sa propre représentation mentale des phénomènes cartographiés.

Du côté de la réception du signal par le destinataire, la connaissance des mécanismes cognitifs intervenant dans la lecture d'une carte peut permettre d'identifier les éléments, au sein d'une représentation cartographique, qui favoriseraient la perception et la construction de connaissances spatio-temporelles par les utilisateurs. Ces mécanismes sont étudiés par la psychologie cognitive et sont présentés ci-après.

2. Application de la psychologie cognitive dans le domaine de la cartographie

La cognition désigne l'ensemble des faits intellectuels mis en œuvre pour « connaître ». Elle se distingue des deux autres catégories de fonctions psychologiques : les faits affectifs et sensitifs (l'affection) et les faits de volonté (la volition) (Nicolas et al., 2007). Selon la psychologie cognitive, l'humain traite l'information selon cinq étapes :

- a. l'individu analyse son environnement,
- b. il construit des représentations internes,
- c. il réorganise ses connaissances,
- d. il stocke ces données en mémoire et
- e. il élabore des réponses.

Pour étudier ces mécanismes, la psychologie expérimentale « décompose le contenu de notre conscience en ses éléments et s'efforce de découvrir leurs rapports de coexistence et de succession » (Nicolas et al., 2007). Notre hypothèse est que l'emploi de certains éléments dans les représentations cartographiques peut activer les processus cognitifs, et ainsi favoriser la construction de connaissances spatiales et/ou une meilleure appréhension de la dynamique spatio-temporelle des phénomènes. Parmi les processus cognitifs intervenant

dans l'exploration des cartes, on peut notamment citer les mécanismes de *perception* et de *lecture*, intervenant dans l'étape d'acquisition de connaissances en provenance de l'environnement et la *mémoire*, appelée dans l'étape de conservation et de rappel des connaissances. Les paragraphes suivants présentent les notions relatives à ces différents mécanismes et comment leur prise en compte peut enrichir la conception de cartes.

2.1. Perception et saillance

La perception est l'ensemble des mécanismes et processus par lesquels l'organisme prend connaissance du monde, sur la base des informations élaborées par les sens (Nicolas et al., 2007). La perception visuelle, en particulier, se décomposerait en quatre étapes (*ibid*) :

- La détection : distinction entre l'objet et le fond et groupement des parties de l'objet,
- Le codage structural : reconnaissance de la forme comme correspondant à une représentation stockée en mémoire,
- Le codage sémantique : attribution d'une signification à la forme, rattachement à une catégorie d'objet,
- Le codage phonologique : association du nom à la catégorie d'objet.

L'étape de détection nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de la cartographie car c'est celle sur laquelle le cartographe va pouvoir agir à travers le choix de la représentation et des variables visuelles.

2.1.1. Détection visuelle

Bonnet propose que les scènes visuelles sont perçues selon deux niveaux : un niveau syntaxique, qui décrit les formes et les relations spatiales entre entités, et un niveau sémantique, qui représente la signification de l'ensemble (Bonnet, 1989). Au sein du cortex visuel, quatre systèmes de détection susceptibles de fonctionner en parallèles co-existeraient (Zeki, 1992) :

- un pour le mouvement,
- un pour la couleur et
- deux pour la forme.

Les informations sur les configurations perçues sont traitées par deux systèmes cérébraux distincts (Kosslyn, 1994) :

- celui qui encode les propriétés spatiales, comme la localisation, la taille et l'orientation,
- celui qui encode les propriétés superficielles des objets telles que la forme, la couleur et la texture.

L'existence de ces systèmes parallèles peut impliquer que l'association de certaines variables visuelles soit plus facilement détectable.

Selon Lloyd (1997), pour représenter des données bivariées, c'est-à-dire représenter simultanément deux attributs d'un objet (par exemple le type de ville et le nombre d'habitants), la combinaison de variables appartenant au même système cérébral serait plus efficace. Par exemple l'association de la couleur avec la forme s'avèrerait plus efficace que la combinaison de la couleur avec la taille ou l'orientation. L'inverse est proposé par Zeki (1992) : selon lui, les systèmes de détection visuelle pourraient fonctionner en parallèle. Cela laisse penser qu'il serait plus rapide de détecter des variables traitées par des systèmes séparés. L'impact de ces combinaisons sur l'efficacité de la lecture reste donc encore à déterminer.

La détection visuelle obéit à des seuils (Lieury, 2004) :

- Des seuils absolus : grandeur de la stimulation qui est juste suffisante pour être perçue (ex : taille minimale d'un objet),
- Des seuils relatifs : écart suffisant entre deux modalités pour qu'elles soient perçues comme différentes (ex : ce seuil est souvent fixé à 2,5% pour les écarts de grandeur entre tailles d'objets).

L'existence des seuils relatifs a pour effet que les modalités de variables sémiologiques employées dans une carte géographique, telles que les tailles de symboles représentant des valeurs quantitatives, doivent différer suffisamment les unes des autres pour que la carte soit facilement lisible.

Le cartographe doit également être attentif au fait que la perception d'un objet peut être faussée par les objets qui sont situés proches de lui dans le champ de vision. Ce fait est notamment impliqué dans les illusions d'optique.

Un premier type d'illusions cognitives est d'ordre géométrique. Par exemple, dans la Figure 3.5, les lignes obliques paraissent déformées à cause des petites lignes secondaires qui les strient. Cela est provoqué par le fait que le cerveau tend à ramener les valeurs d'angles vers des angles droits. En réalité, les lignes obliques sont parallèles entre elles.

Les illusions cognitives peuvent également affecter la perception des couleurs. Une couleur est perçue différemment en fonction de celles qui l'entourent. Une même couleur paraîtra par contraste plus claire lorsqu'elle est visualisée un fond sombre que lorsqu'elle est visualisée sur un fond clair. C'est ce qui se produit dans la Figure 3.6. Les cônes de la rétine peuvent également ne pas parvenir à dissocier correctement certaines teintes de couleurs lorsqu'elles sont reçues dans des zones très proches, ce qui a pour effet de modifier la teinte perçue par rapport à la teinte réelle (ex : Figure 3.7). Un dernier exemple que l'on peut citer est l'effet de contraste successif : lorsqu'un individu fixe longtemps une forme colorée, puis qu'il reporte son regard sur une page blanche, il verra pendant quelques instant la même image apparaître en négatif (Buffon, 1743). Cet effet peut dégrader la perception de couleurs consultées successivement.

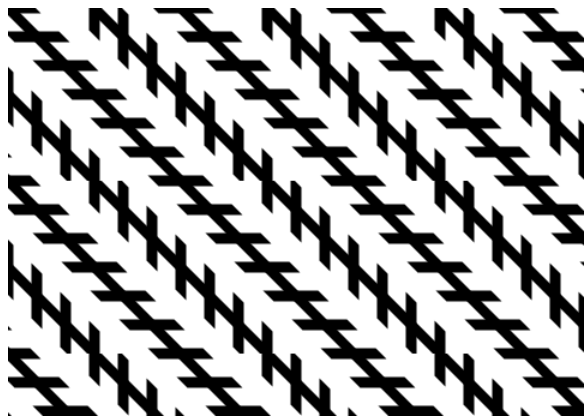


Figure 3.5. Illusion de Zollner : les lignes obliques sont en réalité parallèles.³³



Figure 3.6. Illusion du contraste simultané : la teinte de la barre grise est la même sur toute la longueur.³⁴



Figure 3.7. Illusion de modification des couleurs perçues³⁵

Le système visuel est donc faillible mais, en connaissant ses limites, il est possible de s'y adapter. La lecture des couleurs est notamment affectée par des effets de contrastes simultanés et successifs. Le cartographe peut donc être attentif aux combinaisons de certaines couleurs, afin d'éviter des interférences pouvant compromettre la lisibilité de la

³³ Source de l'image : https://fr.wikipedia.org/wiki/Illusion_de_Zollner#/media/File:Zollner_illusion.svg

³⁴ Source de l'image : https://fr.wikipedia.org/wiki/Illusion_d%27optique#/media/File:Gradient-optical-illusion.svg

³⁵ Source de l'image : <http://www.enigme-facile.fr/illusion-optique-la-spirale-6527>

carte.

2.1.2. Théorie de la forme (Gestalt)

Un processus important dans la détection visuelle est la distinction entre la figure, objet visuel signifiant, et le fond. La détection figure-fond a été théorisée par l'École de la Gestalt (théorie de la forme). La détection des figures suit des lois d'organisation perceptives (Wertheimer, 1912) :

- Loi de la bonne forme : « un ensemble de parties informes (comme des groupements aléatoires de points) tend à être perçu d'abord (automatiquement) comme une forme » (Yharrassarry, 2009).
- Loi de concision : le cerveau tente d'identifier les formes les plus simples possibles (ex : sur l'objet b de la Figure 3.8, le cerveau a tendance à identifier un losange blanc sur fond noir, plutôt que deux demi-cercles échanrés sur fond blanc).
- Loi de similitude : les éléments qui se ressemblent selon un critère sont regroupés.
- Loi de proximité : les éléments proches dans le champ visuel sont regroupés.
- Loi de continuité : des points rapprochés sont d'abord perçus comme une continuité, en tant que forme ou alignement. Le cerveau identifie plutôt des figures continues que des transitions brusques (Nicolas et al., 2007) (Figure 3.9).
- Loi du destin commun : le cerveau regroupe visuellement les objets qui bougent ensemble dans la même direction.
- Loi de l'ensemble objectif (ou de stabilité) : lors des changements, les groupes préalablement identifiés auront tendance à être considérés comme stables (ex : Figure 3.10).
- Loi de clôture : des parties évoquées d'une forme seront remplies mentalement pour compléter cette forme en forme simple (Figure 3.11).
- Loi de familiarité : le cerveau perçoit en priorité les formes ou les arrangements qui lui sont familiers comme des groupes significatifs.

La distinction d'une figure par rapport au fond est d'autant plus favorisée que (Rubin, 1921) :

- la figure a une forme plus facilement mémorisable que le fond,
- que la figure semble recouvrir le fond, être au premier plan,
- que le fond est indifférencié et
- que la figure possède un contour qui la limite.

Pour synthétiser ces règles, si un objet est petit, symétrique et qu'il est orienté verticalement ou horizontalement, il sera généralement perçu comme une figure (Nicolas et al., 2007) (Figure 3.8.a). L'orientation verticale ou horizontale est notamment mieux détectée, ce qui entraîne par exemple que sur la Figure 3.8.c, on perçoit plutôt une croix noire aux bras horizontaux et verticaux sur un fond blanc, qu'une croix blanche avec des bras en diagonale sur fond noir.

) }] ([{ { } () []

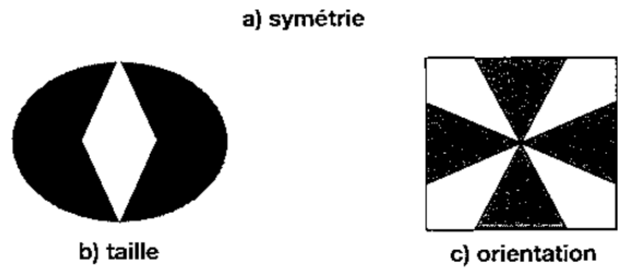


Figure 3.8. Illustration de trois caractéristiques permettant l'émergence d'une figure : a) la symétrie, b) la taille, c) l'orientation (Nicolas et al., 2007)



Figure 3.9. Illustration de la loi de continuité : les points sont mentalement regroupés en alignements, formant ainsi comme deux lignes

time 1	**	**	**	**	**	**	**
time 2	.*	.*	.*	.*	.*	.*	.*
time 3	..*	..*	..*	..*	..*	..*	..*
time 4	...*	...*	...*	...*	...*	...*	...*
time 5*******
time 6*******
time 7*******

Figure 3.10. Illustration de la loi de l'ensemble objectif (MacEachren, 1995, p. 76)

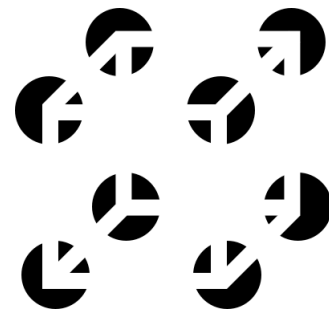


Figure 3.11. Reconstitution d'un cube imaginaire à partir de points (Ladenthin, 2008)

Ces lois sont pour la plupart applicables dans le domaine de la cartographie et se retrouvent dans de nombreuses bonnes pratiques déjà existantes. Par exemple, la loi de similitude permet au lecteur d'identifier les symboles appartenant à une même catégorie de la légende. Coordonnée avec la loi de proximité, elle permet d'identifier des motifs dans la distribution spatiale d'objets de même nature (ex : des zones d'amas de points d'une même catégorie, témoignant d'une concentration d'un phénomène).

Généralement, les objets ayant des localisations proches dans l'espace ont plus de chance d'être en interaction que des objets éloignés, comme l'exprime la première loi de la

géographie : « tout interagit avec tout, mais deux objets proches ont plus de chances de le faire que deux objets éloignés » (Tobler, 1970). La loi de proximité est donc un atout pour la lecture de cartes. En revanche, lorsque tel n'est pas le cas, le cartographe devra prendre garde à ce que la loi de proximité ne fausse pas la détection d'ensembles en réalité non homogènes.

La loi du destin commun s'appliquera dans les cartes animées, où les ensembles de mouvement et, à l'inverse, les objets aux comportements originaux pourront être perçus par l'œil.

La loi de l'ensemble objectif aide à percevoir les changements d'organisation comme un processus cohérent plutôt que comme une suite d'états déconnectés les uns des autres. Elle présente cependant un risque de faire obstacle à la détection de nouveaux arrangements en cours de formation. La loi de clôture a des chances de favoriser la détection d'une forme même si son contour est partiellement masqué par d'autres objets de la carte.

En tant que préconisations en cartographie, la loi de la bonne forme peut avoir pour effet qu'utiliser des symboles simples permettrait d'améliorer la rapidité de l'identification des symboles et donc la vitesse de lecture.

On peut aussi supposer que la loi de continuité fera que le lecteur se concentrera d'avantage sur les ensembles visuellement continus dans la carte que sur les espaces de discontinuités entre ces ensembles et/ou les points isolés, malgré le fait qu'ils puissent être eux-mêmes porteurs de sens. Si ce sont les discontinuités de la série d'éléments qui importent, le cartographe devra alors insister sur leur lecture par exemple en attribuant une figure aux discontinuités elles-mêmes (ex : Figure 3.12).

Enfin, la loi de familiarité peut rendre plus visible certains groupes de points parce qu'ils évoquent une forme connue de l'utilisateur. Cela peut avoir des effets positifs en accélérant le processus de reconnaissance de motifs, mais cela peut également introduire des biais dans les groupes qui seront perçus comme étant les plus significatifs.

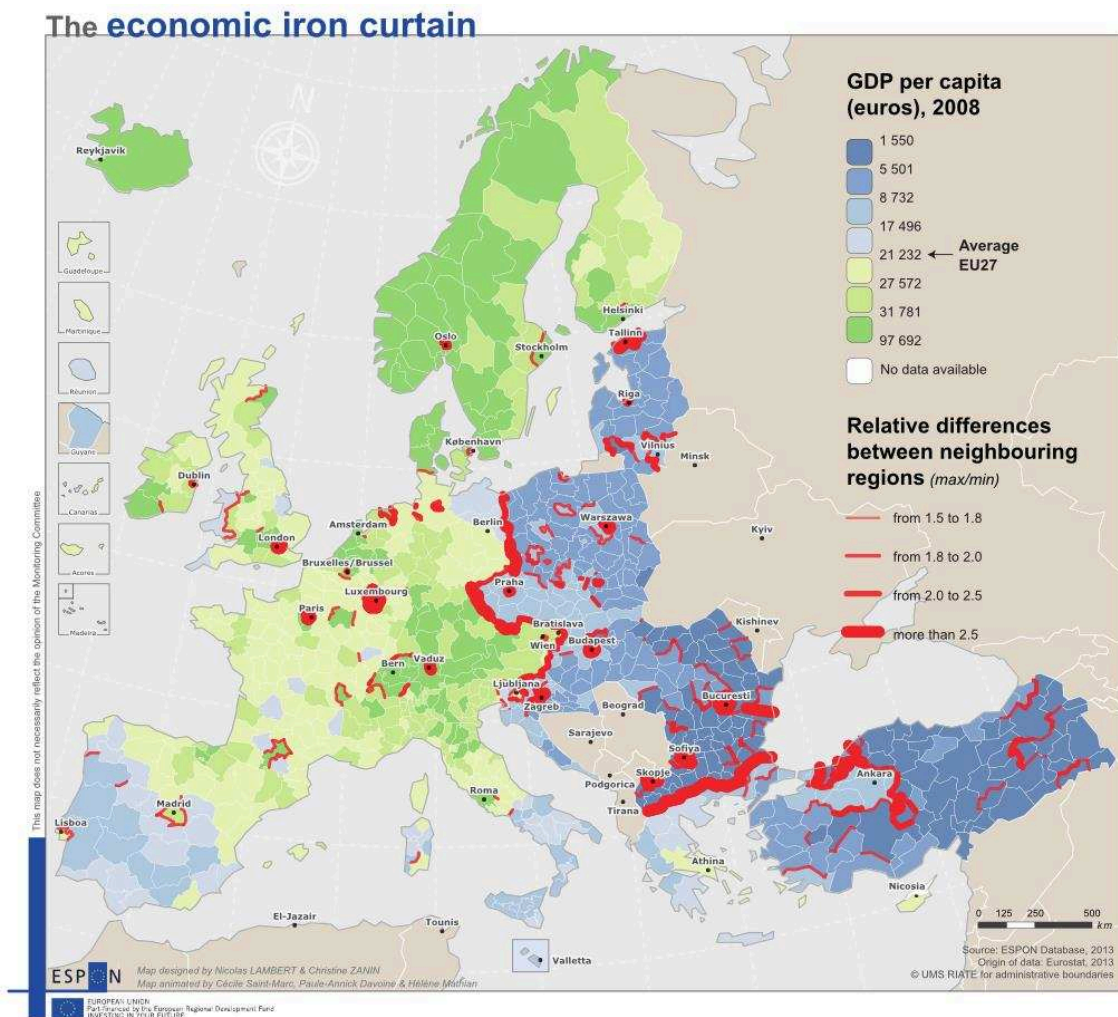


Figure 3.12. Carte mettant en avant les discontinuités de PIB entre régions dans l'Union Européenne (« Le rideau de fer économique », UMS RIATE)

L'étude de la perception nous informe que certains éléments graphiques attirent et/ou focalisent l'attention du lecteur lors de la consultation d'une image ou d'une carte. Les mécanismes de l'attention méritent d'être explorés car ils jouent un rôle dans la perception.

2.1.3. Attention et saillance visuelle

Il existe une différence entre voir et regarder, ou entre entendre et écouter : cette différence, c'est l'attention qu'on porte aux phénomènes perçus (Nicolas et al., 2007). L'attention filtre des stimuli perceptifs pour se concentrer sur l'un d'entre eux et évite ainsi le débordement des capacités cognitives, naturellement limitées. Elle provoque un rehaussement de l'élément auquel l'individu est attentif, par rapport au reste de la scène visuelle. L'attention améliore grandement la qualité du traitement perceptif effectué sur les cibles de la zone d'attention, mais les cibles apparaissant ailleurs sont négligées voire ignorées (*ibid*).

L'attention peut prendre différentes formes. Elle peut être (*ibid*) :

- endogène (résultant d'un effort de volonté) ou exogène (provoquée par un signal de

l'environnement),

- sélective (ou focalisée) ou partagée (diffuse, répartie entre plusieurs sources),
- implicite (non observable physiquement) ou explicite (exprimée par un mouvement physique, tel qu'observer du coin de l'œil),
- une magnification (importance accordée au signal d'intérêt) ou une inhibition (atténuation des représentations non ciblées).

Les cartographes ont beaucoup étudié l'attention exogène induite par certains objets ou choix sémiologiques de la carte ; cet effet de captation de l'attention par une figure est nommé la « saillance visuelle » (ex: Christophe, 2009; Davies, 2015; Fabrikant et al., 2010; Shipley et al., 2013). Le degré de saillance visuelle d'un item se définit comme une fonction de la rapidité avec laquelle il devient l'objet de l'attention et de la durée du maintien de cette attention (Jégou et Deblonde, 2012). En d'autres termes, plus un élément de la carte focalisera vite et longtemps l'attention de l'utilisateur, plus il sera dit saillant.

Certaines études montrent que les zones qui sont les plus regardées au total ne sont pas forcément les plus saillantes mais plutôt celles qui sont les plus pertinentes pour l'analyse (Desimone et Duncan, 1995; Itti et Koch, 2001). Fabrikant et al. ont montré que les zones les plus regardées dépendaient du niveau d'expertise des utilisateurs : si les experts en cartographie regardent effectivement d'avantage les zones les plus intéressantes pour l'analyse, les utilisateurs novices concentrent majoritairement leur attention sur les zones les plus saillantes (Fabrikant et al., 2010). Pomerantz a également noté que lorsque le design rend difficile de maintenir une attention sélective sur certains symboles de la carte, les individus ont tendance à plutôt considérer l'ensemble des symboles comme un groupe et à appliquer une attention divisée (Pomerantz, 1983).

Pour faciliter la lecture d'une carte, il semble donc intéressant d'attribuer des variables visuelles saillantes aux objets les plus importants concernant la thématique cartographiée.

Selon Bertin (1967), la variable visuelle la plus puissante est la position (x,y) dans le plan du graphique. Cette proposition concorde avec les lois de la Gestalt, notamment les lois de la bonne forme, de proximité et de continuité selon lesquelles un ensemble d'éléments proches tendent à être mis en relation visuellement sur la base de leur localisation, pour former des formes, des continuités ou des groupes. Dans les cartes, la position dans l'image est contrainte par la localisation géographique des objets représentés. Il a cependant été démontré que les signes cartographiques sont perçus plus rapidement lorsqu'ils sont placés proches du centre de la carte (Lloyd, 1997).

Le cadrage et l'échelle de cartographie constituent donc des premières variables sur lesquelles jouer pour favoriser la saillance.

La seconde variable visuelle la plus saillante est la couleur (combinant la teinte et la valeur) (Lloyd, 1997). Bertin avait ainsi proposé qu'il est plus aisé de concentrer son attention sur une valeur particulière que sur une forme (Figure 3.13.a) (Bertin, 1967). On peut augmenter la sélectivité des symboles en combinant plusieurs variables visuelles de manière redondante, notamment en associant la couleur à une autre variable, telle que la taille dans la Figure 3.13.b (Bertin, 1967).

Les yeux se dirigent le plus souvent vers des zones fortement contrastées ou présentant des structures linéaires ; c'est pourquoi attribuer un contour aux objets de la carte facilite leur détection en tant que figures (MacEachren, 1995, p. 102-103). Morita (1991) a également montré que, dans une carte utilisant la variable orientation, le regard suit l'orientation des symboles pour se déplacer dans la carte, tandis que dans une carte intégrant la variable taille, il est attiré vers les cercles de plus grande taille.

La couleur puis la taille, dans cet ordre, ont donc une forte influence sur les symboles les plus facilement détectés dans une carte, tandis que l'orientation influe sur l'ordre de lecture.

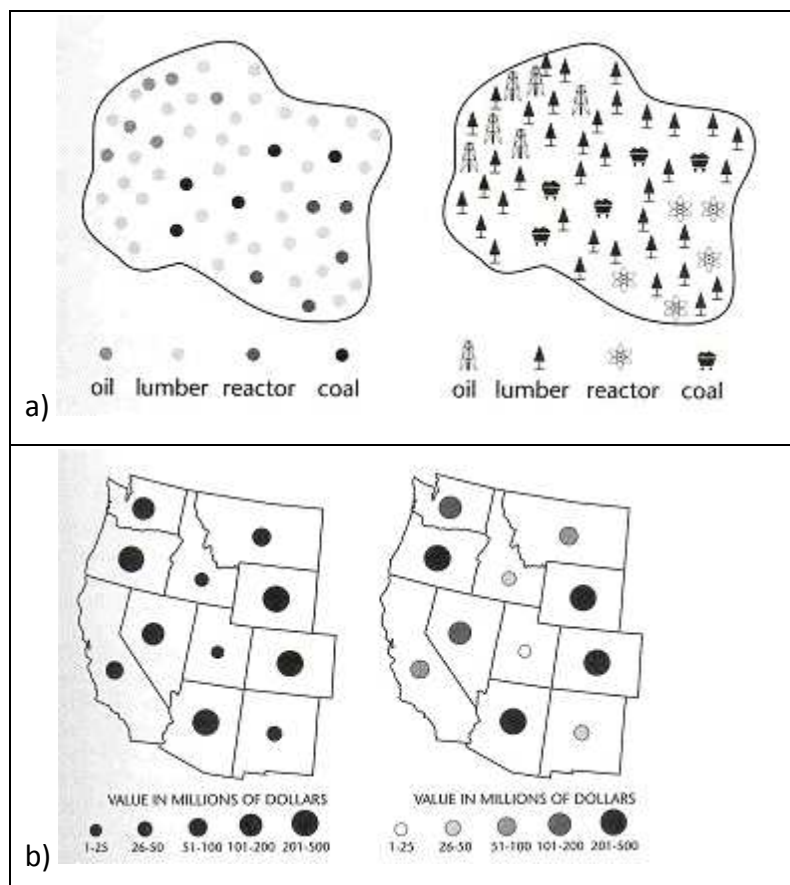


Figure 3.13. Représentations cartographiques favorisant l'attention sélective et l'attention distribuée (MacEachren, 1995, p. 83, 89)

Des modèles de calcul ont été développés pour calculer la saillance des images, en tentant

d'identifier et de reproduire les mécanismes de la perception humaine (Figure 3.14). On peut citer le modèle iNVT (iLab Neuromorphic Vision C++ Toolkit) (Itti et al., 1998; Itti et Koch, 2001) et le modèle SUN (Saliency Using Natural statistics) (Zhang et al., 2008), qui ont été appliqués à la cartographie (Jégou et Deblonde, 2012). L'étude de ces modèles donne des indices sur les variables favorisant la saillance et la détection.

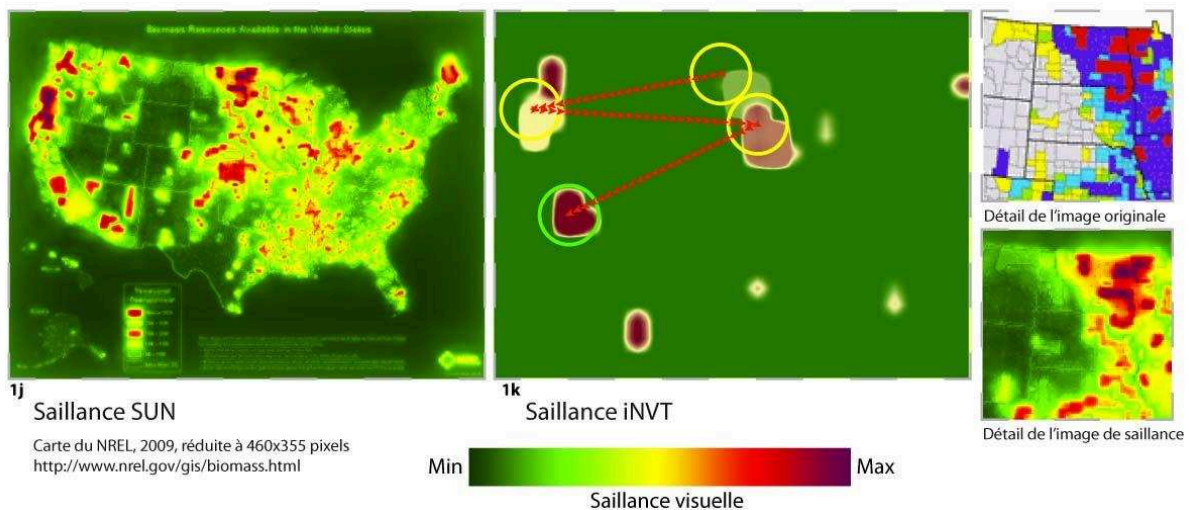
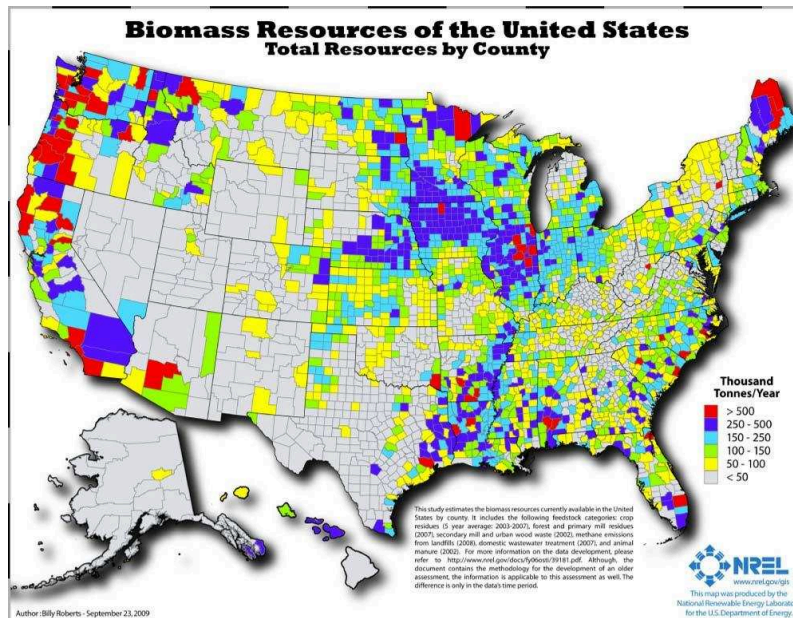


Figure 3.14. Comparaison des résultats d'évaluation de la saillance visuelle d'une carte par les modèles automatiques de calcul SUN et iNVT (Jégou et Deblonde, 2012)

Le modèle iNVT (iLab Neuromorphic Vision C++ Toolkit) (Itti et al., 1998; Itti et Koch, 2001) est basé sur la détection des contrastes de teinte, de valeur et d'orientation, à plusieurs niveaux de résolution dans la scène visuelle. Si la saillance des couleurs est commune avec les résultats de travaux en cartographie, ce modèle introduit aussi le contraste d'orientation, qui peut être rapproché de la tendance de l'œil à s'attacher aux contours et aux structures linéaires (cf. MacEachren, 1995, ci-dessus) et à percevoir les formes et les alignements (lois

de la bonne forme et de continuité de la Gestalt).

Le modèle SUN (Saliency Using Natural statistics) (Zhang et al., 2008) s'appuie sur l'analyse statistique d'un corpus d'image préalablement constitué pour déduire la saillance visuelle d'une nouvelle image qui lui est présentée. La saillance est calculée à l'échelle locale, pour se rapprocher du comportement de l'œil humain qui balaie la scène du regard par saccades successives. Le fait que ce modèle se base sur une collection d'images de références semble s'approcher de l'influence de l'expérience antérieure du lecteur lors de sa consultation d'une image, comme l'introduit la loi de familiarité de la Gestalt (i.e. le lecteur aura plus de facilité à détecter et reconnaître des formes qu'il a l'habitude de rencontrer).

Les modèles de calcul de saillance visuelle présentés ci-dessus ciblent donc le contraste et l'orientation comme indicateurs principaux de la saillance. Ils intègrent également différentes échelles dans le calcul de la saillance : l'échelle locale et l'échelle globale, ce qui correspond en fait au comportement physique de la lecture.

En effet, la zone de vision nette de la rétine de l'œil, la fovéa, est très restreinte (angle de 3° à 5° au centre du champ de vision) et présente une tâche aveugle (correspondant à l'implantation du nerf optique sur la rétine). Le reste de la rétine voit flou et en noir et blanc mais est utile à la perception des différences d'intensité lumineuse. Pour visualiser une image de façon nette dans son ensemble, l'œil doit donc réaliser des saccades successives, au cours desquelles seul le centre de chaque zone regardée sera net et le reste de la scène sera flou. La zone périphérique de la rétine est en revanche très efficace pour détecter les mouvements et les changements et permet également de garder une représentation approximative des positions des objets déjà regardés.

Lorsque l'œil est fixé sur une zone spécifique, la zone périphérique floue ne sera capable de détecter que les forts contrastes ainsi que les mouvements, ce qui explique la plus grande rapidité du lecteur à aller regarder ces zones de la carte.

La question de l'exploration visuelle à différentes échelles amène à considérer la différence entre perception pré-attentive, lors de la première vision d'une image, et exploration consciente, dirigée par le cerveau pour répondre à l'objectif de lecture.

2.1.4. Détection pré-attentive et détection consciente

La lecture met en œuvre des processus automatiques et rapides, ne nécessitant pas de concentration, et des processus contrôlés et lents, qui nécessitent une attention soutenue (Shiffrin et Schneider, 1977).

Le traitement automatique est dit « pré-attentif », en ce qu'il s'exerce de façon automatique et très rapide (moins de 500 millisecondes) sans action consciente. Il est superficiel, parallèle, il peut être mené en dehors de la fovéa, il a une grande capacité, ne peut pas être

inhibé et ne dépend pas de la charge cognitive, c'est-à-dire qu'il est réalisé sans effort. On le qualifie de processus *bottom-up*, au sens où c'est le stimulus visuel qui guide le regard.

Le traitement contrôlé utilise majoritairement la fovéa, il est détaillé, ordonné et a une faible capacité. Il est dit *top-down* car il est dirigé par le cerveau lors d'un processus impliquant le raisonnement.

Les propriétés pré-attentives d'une image sont utilisées en visualisation d'information et en cartographie pour faciliter la perception de motifs ou la compréhension globale sur les jeux de données, tout en laissant plus de capacités cognitives disponibles pour traiter les informations détaillées (Card et al., 1999; MacEachren, 1995). Les propriétés visuelles pré-attentives utilisées en visualisation sont : la couleur, la forme, la taille, l'orientation, le mouvement et la position spatiale (Ware, 2004), mais il en existe bien d'autres (Tableau 3.1). On remarque que ces propriétés pré-attentives correspondent à celles qui rendent un objet saillant.

Tableau 3.1. Propriétés visuelles pré-attentives qui peuvent être traitées automatiquement (Healey et al., 1995)

Nombre	Terminaisons	Direction du mouvement
Orientation des lignes	Intersection	Ombrage (<i>Binocular luster</i>)
Longueur	Clôture	Profondeur stéréoscopique
Largeur	Couleur	Profondeur 3D
Taille	Intensité	Orientation de la lumière
Courbure	Clignotement	

Les propriétés pré-attentives peuvent donc être utilisées sciemment par le cartographe pour :

- attirer l'attention du lecteur sur les objets les plus pertinents pour l'analyse,
- permettre une perception rapide et sans effort du message principal de la carte.

L'usage de processus automatiques ou contrôlés par le cerveau dépend de la nature des propriétés visuelles, mais aussi de la charge en mémoire : si le nombre de paramètres qu'on essaie de détecter en même temps est élevé ou si la scène visualisée est complexe (ex : grand nombre d'éléments potentiellement intéressants) alors l'individu aura d'avantage recours à des processus contrôlés, moins efficaces (Shiffrin et Schneider, 1977).

Dans le cas de scènes complexes, les variables pré-attentives présentent donc des limites. Le cartographe gagnerait à limiter leur usage aux objets cartographiques les plus importants et à éviter de combiner un trop grand nombre de ces variables au sein d'une même carte.

La détection des zones saillantes est légèrement modifiée lorsque les cartes deviennent animées. Fabrikant et Goldsberry (2005) ont montré que, dans une carte dynamique, les changements entre deux scènes successives sont repérés le plus rapidement, au détriment

des signes les plus saillants de chaque scène. L'usage du mouvement, notamment du clignotement, est efficace pour capter l'attention mais peut aussi avoir un effet néfaste de distraction du reste de la visualisation (Interaction Design Foundation, 2016).

Les variables visuelles animées (qui seront décrites dans la section V.2.2.2) ont un fort pouvoir d'attraction de l'attention, mais doivent être réservées à des messages simples, sous peine de brouiller la lecture des autres variables.

Pour conclure sur la perception visuelle, les caractéristiques de la vision, notamment les théories de la forme et le principe de saillance, peuvent être exploités pour produire des cartes plus lisibles et plus efficaces. Nous avons tenté d'illustrer les méthodes de représentation tirant partie de ces propriétés au fil du texte. L'application de ces méthodes peut permettre d'accélérer la perception des informations importantes, tout en minimisant les ressources mentales nécessaires.

Dans la suite du processus cognitif de lecture, les données détectées par le système visuel sont ensuite traitées et intégrées dans une représentation mentale du message transmis, interne au lecteur. La représentation est bâtie pièce par pièce jusqu'à former un schéma de compréhension global du message cartographique. L'étude de ces mécanismes peut nous conduire à émettre de nouvelles préconisations de représentations cartographiques aptes à favoriser la compréhension.

2.2. Lecture et compréhension

2.2.1. Mécanismes de compréhension

La compréhension d'un message lu est une activité mentale multidimensionnelle, dont le but est de construire une représentation mentale du message transmis (Nicolas et al., 2007). Comprendre un texte, c'est construire différents niveaux de représentation du texte en mémoire (Johnson-Laird, 1980, 1983) :

- une représentation de surface : représentation des mots employés,
- une représentation propositionnelle : représentation du contenu sémantique de la phrase, et
- un modèle mental : représentation de ce qui est implicite dans le texte lu, cette partie incluant les connaissances propres du lecteur.

On peut penser que la compréhension d'un message cartographique obéit à des règles similaires, dans un contexte où les mots sont remplacés par des signes.

La compréhension du message cartographique reposerait donc sur :

- une représentation mentale des signes et des variables visuelles,
- une représentation du contenu sémantique de la carte,
- une représentation liant le message cartographique aux connaissances antérieures

du lecteur.

Pour construire ces représentations, donc pour pouvoir traiter l'information, il faut que les variables visuelles employées et le contenu sémantique de la carte soient faciles à percevoir.

La construction d'une représentation mentale est d'abord un processus *bottom-up*, conditionné par la scène visuelle (comme nous l'avons vu dans la section IV.2.1.4), puis séquentiel, impliquant des itérations de processus *bottom-up* et *top-down* entre le système perceptif et le système cognitif. En présence d'une scène visuelle complexe, la lecture va passer par ce processus itératif visant à former une image globale à partir de représentations partielles combinées (Pinker, 1990). A chaque itération, les nouvelles connaissances perçues vont être traitées et intégrées aux représentations mentales préexistantes pour les compléter (*ibid*).

La représentation mentale ainsi construite est très sensible aux connaissances antérieures du lecteur et aux inférences qu'il réalise par rapport au texte initial (Garnham et Oakhill, 1996). Lorsque des sujets doivent intégrer des informations sur lesquelles ils ont déjà des représentations stockées en mémoire, un changement d'attention se produit : les sujets vont chercher à extraire de plus amples informations de la scène visuelle, qu'ils pourront confronter à leurs représentations internes (Pinker, 1990).

A tous les niveaux de représentation, la représentation mentale peut légèrement différer du message initial. Deux raisons principales ont été identifiées :

- D'une part parce que le processus de construction de ces représentations implique un résumé de l'information pour ne retenir que l'essentiel (Lieury, 2004) (cf. section IV.2.3.3).
- D'autre part, la représentation mentale d'un symbole stockera ses traits saillants et distinctifs plutôt que son intégralité (Nicolas et al., 2007) (ce point sera explicité dans la section IV.2.3.2).

Dans le cadre de la cartographie, le fait que l'information mémorisée soit résumée nous semble impacter la représentation propositionnelle (i.e. du contenu sémantique), tandis que la mémorisation des traits saillants et distinctifs modifiera probablement la représentation de surface du signe graphique. Le cartographe doit veiller à ce que les traits saillants du message cartographique, qui seront retenus dans le résumé mental et mémorisés comme des traits distinctifs, soient bien ceux qui concourent à la compréhension du message global.

Suite à ce constat, nous posons l'hypothèse que l'emploi de symboles iconiques ou évocateurs, porteurs de sens (plutôt que des symboles abstraits) peut rendre plus lisible la sémantique associée à un symbole cartographique et ainsi aider sa mémorisation.

Les symboles utilisés dans la carte doivent également être clairement différents physiquement les uns des autres, pour que leurs caractéristiques simplifiées stockées en

mémoire (Nicolas et al., 2007) permettent de les distinguer aisément.

2.2.2. Faciliter la lecture

Nous avons vu que l'usage de la saillance et de variables visuelles pré-attentives facilitent la perception visuelle des cartes (cf. section IV.2.1.3 et 2.1.4). Cependant, ces paramètres n'influencent la lecture que dans les premières secondes de consultation de la carte, sans présager de ce qu'elle contient ni des objectifs sous-tendant la lecture, ce qui constitue une simplification importante du processus de lecture (Davies, 2015). Les travaux réalisés en psychologie donnent des informations sur les mécanismes et les paramètres intervenant dans la lecture de texte, qui pourraient être transposés à la cartographie.

L'étude du langage peut s'adresser à plusieurs niveaux, composant la langue (Lieury, 2004) :

- les phonèmes ou syllabes,
- les mots et leurs associations,
- la syntaxe et la grammaire,
- le niveau sémantique,
- le récit complet.

Lors de la compréhension d'une phrase, l'analyse sémantique est réalisée plus précocement par les jeunes enfants que l'analyse syntaxique. Cela laisse supposer que, lors du processus de compréhension d'une phrase, la sémantique (la signification associée aux concepts présentés) est perçue par le cerveau en premier, avant la syntaxe (la forme et les relations entre les mots) (Lieury, 2004).

Dans le contexte de la cartographie, ce phénomène peut influencer la lecture des symboles ou des variables visuelles : il permet de poser l'hypothèse que les lecteurs d'une carte vont d'abord percevoir et déduire la signification iconique ou culturelle associée aux symboles, en fonction de leurs connaissances antérieures, avant d'interpréter leur syntaxe.

Par analogie aux définitions propres au langage, la « syntaxe des symboles » est constituée à la fois de la forme associée aux symboles par la légende (signification réelle, prévue par le cartographe) et des relations entre les figures de la carte et le fond (relations entre figures voisines dans la carte).

Cet état de fait peut avoir deux conséquences néfastes pour la lecture de la carte : 1) les symboles peuvent être mal interprétés, dans le cas où les utilisateurs s'en tiennent à leur première impression, ou 2) les représentations intuitivement élaborées par l'utilisateur et celle imposée par le cartographe via la légende peuvent entrer en conflit et interférer avec la construction d'une représentation mentale, ce qui aurait pour effet de ralentir et compliquer la lecture.

Des travaux en cartographie ont montré que les lecteurs de cartes lisent généralement en premier la carte, avant de lire la légende (Graziano, 2009, p. 72) ce qui semble conforter cette hypothèse.

L'usage de symboles iconiques et/ou de variables visuelles évocatrices, correspondant à la culture et aux habitudes des utilisateurs (tel qu'évoqué dans la section précédente) peut permettre d'éviter les mauvaises interprétations, liées à la perception de la sémantique des symboles avant leur syntaxe.

La lecture d'un texte est soumise à des effets d'amorçage (D. E. Meyer et Schvaneveldt, 1971) : il s'agit d'un stimulus qui déclenche des activités normalement produites par un second stimulus qui survient après. Il peut s'agir d'effets de *stimulation* ou d'*inhibition*, agissant sur des délais courts entre stimulus et cible (quelques centaines de millisecondes). Un premier effet qui accélère la lecture d'un mot est l'effet de fréquence : un mot fréquent dans la langue ou dans un texte est traité plus rapidement qu'un mot rare, pour toutes les tâches dans lesquelles il sera impliqué (lire, catégoriser, épeler...) (Nicolas et al., 2007).

Généralisé au cas de la lecture d'images et de cartes, cette règle se rapproche de la loi de familiarité issue de la Gestalt (cf. section IV.2.1.2) : plus une figure est familière, plus elle sera détectée rapidement.

L'usage de symboles souvent rencontrés par les lecteurs ou standardisés peut donc faciliter la lecture de la carte.

D'autres facteurs influencent la lecture, bien que leur effet soit moins fort que l'effet de fréquence (*ibid*) :

- la longueur d'un mot et son caractère abstrait ralentissent la lecture,
- l'âge d'acquisition et la catégorie syntaxique du mot impactent aussi la rapidité de lecture, et
- l'effet de voisinage orthographique fait que les voisins proches en orthographe (ex : jupe et juge) et plus fréquents qu'un mot cible vont avoir un impact sur sa rapidité de traitement (Grainger et al., 1989).

Dans une carte géographique, on peut donc supposer que l'usage de symboles: 1) non-abstraites ou, en d'autres termes, iconiques, 2) possédant des formes simples (ce qui serait équivalent à des mots courts) et 3) distincts physiquement les uns des autres (pour éviter les voisinages « orthographiques »), peut accélérer la lecture de la carte et, par la suite, améliorer la compréhension.

Pour conclure sur les mécanismes de lecture et de compréhension, l'intégration des informations dans une représentation mentale est inter-reliée au fonctionnement de la mémoire. Lors de la lecture d'une carte, la mémoire intervient sous deux formes :

- à court-terme, durant la période de prise de connaissance du contenu, ce qui permet de comparer et mettre en relation les formes détectées entre elles, et
- à plus long-terme, par exemple au cours d'une animation cartographique où le

lecteur doit stocker les scènes antérieures en mémoire et y refaire appel lors de l'apparition des nouvelles scènes pour pouvoir comparer les informations nouvellement perçues avec celles mémorisées.

Cette distinction entre mémoire à court-terme et à long-terme fait partie du modèle modal de la mémoire, présenté dans la section suivante.

2.3. Mémoire

La mémoire désigne à la fois la faculté de l'esprit d'enregistrer et de conserver les connaissances, mais aussi celle de rappeler les expériences passées. La mémoire traite l'information selon trois étapes (Nicolas et al., 2007) :

- l'encodage : l'information est détectée, perçue et transformée en un format adapté à la représentation en mémoire,
- le stockage : consolidation, pour conserver dans la mémoire permanente les traces encodées,
- la récupération : réactualisation des connaissances antérieures.

D'après les travaux en psychologie, il existerait plusieurs types de mémoire, décrits dans le paragraphe suivant.

2.3.1. Modèle modal de la mémoire

Le modèle de la mémoire le plus couramment utilisé est le modèle modal de la mémoire (Atkinson et Shiffrin, 1968). Il divise la mémoire en trois sous-systèmes :

- le *registre sensoriel*, qui retient l'information sous forme visuelle pendant un temps extrêmement court,
- la *mémoire à court-terme*, ou *mémoire de travail*, qui contient un nombre limité d'éléments pendant quelques secondes,
- la *mémoire à long-terme*, qui ne connaît pas de limite définie de capacité ou de durée.

Le registre sensoriel correspond aux mécanismes intervenant dans l'œil lors de la vision, notamment à la persistance très brève du stimulus visuel sur la rétine.

La mémoire de travail permet de maintenir temporairement l'information et de la manipuler pour réaliser des tâches complexes. Il existe une quantité d'information maximale que le cerveau humain peut traiter, qui se limite généralement à 7 éléments plus ou moins 2. Ce chiffre émis par Georges Miller (1956) correspond à la capacité de la mémoire à court-terme (Nicolas et al., 2007).

En cartographie, cela implique que le nombre maximal de symboles appartenant à une catégorie de la légende ou le nombre de couleurs attribués à une variable quantitative discrétisée ne doivent pas dépasser 7 +/- 2 (Le Fur, 2007).

Baddeley et Hitch (1974) ont proposé un modèle de la mémoire de travail, qui serait composée de :

- Une boucle phonologique, qui répète les informations verbales ou prononçables, pour prolonger la trace phonologique et retarder l'oubli.
- Un calepin visuo-spatial qui, comme son nom l'indique, maintient l'information visuelle et spatiale (2D ou 3D). Ce système comprend lui-même :
 - o un registre de stockage passif, qui maintiendrait des informations visuelles aspatiales (ex : couleur, forme),
 - o un mécanisme actif, retenant les localisations spatiales et les mouvements et qui permet le rafraîchissement de l'information.
- Un centre exécutif, qui traite les informations mémorisées par les deux autres systèmes et les met en parallèle avec le contenu de la mémoire à long-terme, par exemple pour remplir une tâche.

Les sous-systèmes de mémorisation phonologique (lecture de texte, perception auditive) et visuo-spatial (perception visuelle) sont partiellement indépendants (Khalil et al., 2005). Cela implique qu'ils ont chacun un volume de stockage qui leur est propre et que les informations stockées dans chacun d'eux peuvent se compléter, tout comme elles peuvent être stockées et traitées de façon partiellement indépendantes.

Dans le cadre de la cartographie, nous posons l'hypothèse que ce modèle de la mémoire à court-terme implique que la présence de texte ou de son dans la carte peut compléter les informations visuelles et spatiales de façon efficace, sans surcharge de ces deux systèmes.

Les informations de la mémoire de travail sont entreposées dans la mémoire à long-terme via deux processus (Wikipedia, 2016c) :

- l'autorépétition de maintien, qui consiste à répéter mentalement l'information à apprendre (Atkinson et Shiffrin (1968) pensent notamment que la probabilité d'intégration dans la mémoire à long-terme dépend de la durée de présence en mémoire à court-terme),
- l'autorépétition d'intégration, qui consiste à lier sémantiquement l'information nouvelle à une autre déjà connue.

La lecture d'une carte géographique mobilisera à la fois la mémoire à court-terme, lors de la prise de connaissance de la carte et l'exploration de la scène visuelle, et de la mémoire à long-terme qui va enregistrer certaines informations jugées pertinentes au regard de l'objectif de lecture et des centres d'intérêt du lecteur.

La modèle modal de la mémoire, associant mémoire à court et à long-terme, a été réfuté par Craik et Lockhart (1972), qui pensent que la mémorisation est plutôt à corréluer avec le niveau

de traitement de l'information. Ces auteurs distinguent :

- Un traitement superficiel, qui consiste en une analyse physique et structurale de l'objet d'intérêt. Il produit des traces relativement transitoires.
- Un traitement profond, qui consiste en une analyse sémantique et un enrichissement associatif de l'objet perçu. Il produit des traces très durables et améliore les performances mnésiques.

Dans le cadre de la cartographie, ces deux modèles peuvent apporter des visions complémentaires. Leur combinaison nous permet d'émettre l'hypothèse que si les objets intégrés dans la mémoire à court-terme ne sont analysés qu'au regard de leur forme visuelle et de leur position, alors ils ne seront pas retenus dans la mémoire à long-terme. En revanche, s'ils sont analysés sémantiquement et mis en relation avec leur contexte et des représentations internes pré-existantes provenant de la mémoire à long-terme, alors il est plus probable qu'ils soient mémorisés. On pourrait comparer ce degré de traitement à la différence entre retenir par cœur et comprendre ce qui est appris.

En pratique pour la cartographie, cela signifie que la forme visuelle des symboles et la position dans le plan ne produisent que des traces transitoires en mémoire. Le cartographe aurait donc intérêt à rendre lisible facilement la sémantique associée aux symboles pour favoriser leur compréhension et leur mémorisation.

La mémoire de travail ne fonctionne usuellement que jusqu'à un certain seuil, au-delà duquel elle est dite surchargée. La notion de charge cognitive de la mémoire peut s'appliquer aussi bien lors des processus de perception que de mémorisation.

2.3.2. Charge cognitive

Définitions

Selon la théorie de la charge cognitive (Paas, Renkl, et al., 2003; Sweller, 1988; Sweller et Chandler, 1991), la mémoire de travail a une capacité limitée, qui est remplie par une *charge cognitive*. La théorie reconnaît trois types de charges cognitives (Paas, Tuovinen, et al., 2003) :

- La charge cognitive *intrinsèque* est produite par des éléments dans le contenu de l'information ou du problème à résoudre,
- les charges cognitives *extrinsèque* et *germaine* proviennent toutes deux de la forme et du contexte de présentation de l'information, mais diffèrent par leurs effets :
 - o la charge cognitive *extrinsèque* a pour conséquence de distraire l'apprentissage et d'inhiber la construction de schémas de connaissance en mémoire.
 - o la charge cognitive *germaine*, en revanche, a un effet positif : affectée par le contexte d'apprentissage ou les connaissances antérieures de l'individu, elle

contribue au processus de construction d'un schéma mental.

Lors de la présentation d'une information visuelle, l'objectif va donc être de maximiser la charge cognitive germaine et de minimiser les charges intrinsèque et extrinsèque. Cependant, ce processus d'optimisation doit se faire dans les limites des capacités cognitives disponibles, également appelées *ressources mentales*. A titre d'exemple, si l'énoncé de la tâche à réaliser est complexe (charge intrinsèque élevée) et si le design de présentation de l'information est peu clair (charge extrinsèque élevée), alors la charge cognitive totale peut excéder les ressources mentales disponibles, comme illustré sur la Figure 3.15. Dans ce cas, la mémorisation de l'information, nécessaire pour résoudre la tâche, peut échouer.

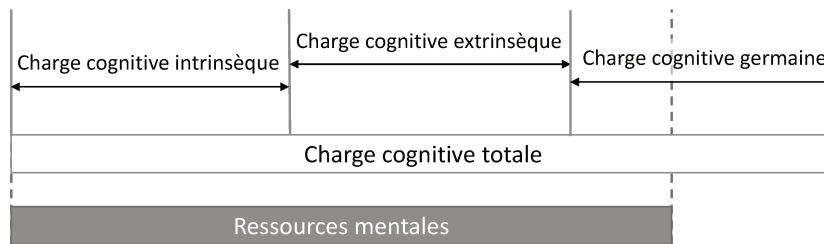


Figure 3.15. Illustration du dépassement des ressources mentales par la charge cognitive totale, provoquant une surcharge cognitive (d'après Khalil et al., 2005)

Diminuer la charge cognitive

Pour mémoriser, et a fortiori pour apprendre, il faut commencer petit, c'est-à-dire simplifier le langage, le temps d'acquérir les concepts simples, avant d'augmenter peu à peu la quantité de savoir à retenir (Gigerenzer, 2009). On peut supposer que ce concept s'applique également à l'apprentissage de la lecture d'une carte ou d'un outil de géovisualisation.

Diminuer la quantité d'informations représentées dans la carte, au moins dans un premier temps, pourrait permettre aux lecteurs de se familiariser avec les concepts présentés et de bâtir un bagage sémantique et méthodologique, qui leur permettrait ensuite d'intégrer de nouvelles informations à la visualisation et à leur raisonnement. Cette démarche, consistant à compléter l'information par pallier vise à diminuer les charges cognitives intrinsèque et extrinsèque, tout en encourageant la construction de schémas de connaissances dans la mémoire à long-terme. Ces schémas pourront ensuite augmenter la charge cognitive germaine.

La production d'une carte est un compromis entre la simplification du territoire, pour pouvoir le représenter à petite échelle, et l'exhaustivité des informations cartographiées. Albert Einstein formulait cet art de la simplification en déclarant : « Il faudrait tout rendre le plus simple possible, mais pas plus ».

Dans une expérimentation en cartographie, Wilkening and Fabrikant (2011) demandaient aux participants de détecter les zones où le relief était plat (plus faible pente) à partir de quatre types de cartes, possédant des degrés de réalisme variés : lignes de niveau, ombrage des pentes clair, ombrage des pentes foncé, pentes pré-calculées. Les résultats ont montré que la

carte comportant les pentes pré-calculées donnait la meilleure précision de réponse.

Ce résultat permet de déduire que le réalisme des cartes n'améliore pas la précision des réponses et qu'il vaut mieux délivrer une information plus directement pertinente même si elle est plus abstraite. Cela permet de diminuer la charge cognitive intrinsèque.

D'autres méthodes de visualisation, listées par Khalil et al. (2005), permettent de diminuer la charge cognitive extrinsèque :

- le regroupement visuel et séquentiel des informations reliées thématiquement (Rieber, 1991b),
- la segmentation de l'information en unités qui correspondent aux représentations mentales (Zacks et Tversky, 2001),
- l'usage combiné de signaux visuels et sonores (Moreno et Mayer, 1999; Mousavi et al., 1995),
- la contiguïté visuelle entre les textes et les scènes auxquelles ils se rapportent (Moreno et Mayer, 1999), ou
- la saillance visuelle des données d'intérêt (Jeung et al., 1997).

D'autres stratégies de présentation ont également été conçues pour diminuer la charge cognitive intrinsèque (Khalil et al., 2005) :

- présenter les informations de façon échelonnée et au bon moment (Van Merriënboer et al., 2003) ou
- segmenter la présentation en deux phases, la première présentant les informations de façon isolées et la seconde ajoutant leurs interactions (Pollock et al., 2002).

On retrouve, dans ces résultats expérimentaux, les conclusions émises suite à l'étude des stratégies de mémorisation, identifiées dans la section IV.2.3.2 : la complémentarité entre texte ou son et images, la présentation d'information sous forme catégorielle organisée et la saillance des objets les plus importants à mémoriser sont des paramètres qui peuvent favoriser la mémorisation des informations cartographiées.

Certaines techniques de visualisation peuvent également promouvoir la charge cognitive germaine (Khalil et al., 2005) :

- l'introduction de l'interactivité dans une visualisation dynamique, qui aide en même temps à réduire la charge cognitive extrinsèque (Bodemer et al., 2004; Schwan et Riemp, 2004),
- l'imagination d'applications concrètes (Cooper et al., 2001),
- la variabilité des contextes d'études (Paas et Van Merriënboer, 1994),
- la mise en place d'objectifs intermédiaires pour résoudre un problème (Catrambone et Richard, 1998) et
- les méthodes de résolution basées sur l'anticipation des résultats (Hegarty et al., 2003; Renkl, 1997).

Rendre la carte interactive, en permettant à l'utilisateur de diminuer la quantité d'informations visualisées, et l'encourager à segmenter le problème en résolvant des objectifs intermédiaires, peuvent aider à augmenter la charge cognitive germaine, favorisant la compréhension et la mémorisation de l'information.

La prise en compte des mécanismes cognitifs intervenant dans la consultation d'une carte permettent donc d'identifier des méthodes de présentation d'informations et de visualisation qui permettent de favoriser la détection visuelle, d'améliorer la compréhension et la mémorisation et de diminuer la charge cognitive. La carte devient ainsi plus efficace, en se conformant aux modes de fonctionnement cognitif des lecteurs.

2.4. Synthèse

L'étude des mécanismes cognitifs permet de formuler de nouvelles règles de représentations graphiques pour garantir l'efficacité des cartes.

Concernant la détection visuelle, les symboles employés doivent être assez différents les uns des autres pour être facilement détectés et mémorisés. Le producteur de la carte doit également prendre garde aux illusions cognitives, telles que l'effet de contraste simultané. La théorie de la Gestalt conseille d'utiliser des symboles de forme simple.

Pour favoriser la détection et la mémorisation, il est conseillé de rendre plus saillants les objets les plus intéressants thématiquement grâce à l'attribution d'une position centrale dans la carte, l'usage de la couleur, du contraste d'intensité et du mouvement, par exemple le clignotement. L'usage de ces propriétés traitées pré-attentivement par le système visuel participeront à diminuer les charges cognitives intrinsèque et extrinsèque.

Pour améliorer la mémorisation des scènes visuelles, il faut « commencer petit » dans les fonctionnalités proposées par l'outil (actions simples, répétition des séquences d'action à réaliser à l'aide de la carte) et dans le fond et la forme du message transmis (représentations cartographiques peu chargées en informations, variables visuelles en nombre limité), afin de laisser le temps aux utilisateurs novices de construire leurs représentations internes. Cela permet ensuite de stimuler la charge cognitive germaine, qui fait référence à l'appel aux représentations préalables des lecteurs. Pour améliorer les facultés de mémorisation, il est conseillé de présenter les données sous forme organisée, d'encourager le traitement sémantique et la compréhension des symboles et pas seulement de leur forme, et de fournir des indices visuels qui aident les utilisateurs à sélectionner les informations les plus importantes à stocker dans leur mémoire à long-terme.

La prise en compte de la cognition assiste la visualisation, mais c'est bien entendu dans l'objectif qu'ensuite la visualisation puisse amplifier la cognition. Un résumé des manières dont les visualisations peuvent amplifier la construction de connaissances est donné dans le Tableau 3.2 (Card et al., 1999).

Nous avons vu que l'inspiration des découvertes en sciences cognitive peut conduire à élaborer des cartes plus lisibles et efficaces. Les cartes produites doivent ensuite être évaluées pour valider leur efficacité réelle auprès du public auquel elles se destinent. Là encore, les travaux en psychologie peuvent nous apporter des méthodes d'évaluation centrées humain.

Tableau 3.2. Comment la visualisation d'informations amplifie la cognition (traduit de l'anglais d'après (Card et al., 1999))

Effet	Description
En augmentant les ressources...	
Interaction hiérarchique à large bande	Le balayage par le regard partitionne les capacités limitées du canal de perception visuelle, de façon à combiner une haute résolution spatiale et une large ouverture, hors de la reconnaissance de l'environnement visuel (Resnikoff, 1987)
Traitements perceptuels parallèles	Certains attributs des visualisations peuvent être traités en parallèle en comparaison de la lecture de textes, forcément linéaire
Report de charge de travail du système cognitif vers le système perceptuel	Certaines inférences cognitives effectuées mentalement peuvent être recodées en inférences réalisées avec des opérations perceptuelles simples (ex : poser une multiplication à l'écrit) (Larkin et Simon, 1987)
Mémoire de travail étendue	Les visualisations peuvent étendre la mémoire de travail disponible pour résoudre un problème (Norman, 1993)
Stockage d'information étendu	Les visualisations peuvent stocker de grandes quantités d'informations dans une forme rapidement accessible
En réduisant la recherche...	
Caractère local des traitements	La visualisation groupe les informations à utiliser ensemble, ce qui réduit la recherche (Larkin et Simon, 1987)
Haute densité de données	La visualisation peut souvent représenter une grande quantité de données dans un espace réduit (Tufte, 1983)
Adresses indexées spatialement	En groupant les données à propos d'un objet, les visualisations peuvent éviter les labels symboliques (Larkin et Simon, 1987)
En améliorant la reconnaissance de motifs...	
Reconnaissance au lieu de rappel	Reconnaître l'information générée par une visualisation est plus facile pour l'utilisateur que de se remémorer cette information
Abstraction et agrégation	Les visualisations simplifient et organisent l'information, fournissant aux centres cognitifs supérieurs des formes agrégées d'informations à travers l'abstraction et l'omission sélective (Card et al., 1991; Resnikoff, 1987)
Schéma visuel d'organisation	Organiser les données par des relations structurelles (ex : par date) permet de mieux percevoir les motifs
Valeurs, relations, tendances	Les visualisations peuvent être construites pour mieux donner à voir les motifs au niveau des valeurs, des relations et des tendances (Bertin, 1981)
En permettant les inférences perceptuelles...	

Les représentations visuelles rendent certains problèmes évidents	Les visualisations permettent de réaliser un grand nombre d'inférences perceptuelles de façon très simple pour l'humain (Larkin et Simon, 1987)
Traitements graphiques	Les visualisations peuvent permettre de réaliser des traitements graphiques spécialisés complexes (Hutchins, 1996)
En améliorant la surveillance	Les visualisations peuvent permettre de surveiller un grand nombre d'événements potentiels, si la visualisation est organisée de façon à les rendre saillants par leur apparence ou leur mouvement.
Grâce au medium manipulable	A l'inverse des diagrammes statiques, la visualisation peut permettre d'explorer un espace de paramètres et peut amplifier les opérations de l'utilisateur.

3. Evaluation des cartes auprès des utilisateurs

Le travail de construction d'une représentation cartographique se base sur des hypothèses ou des règles issues de la littérature scientifique (cf. section II.1.1). Ces règles sont cohérentes dans un contexte scientifique donné et dans la représentation de ce contexte par le cartographe (cf. section IV.1). Cependant, elles méritent d'être validées objectivement auprès des utilisateurs, en particulier si elles sont destinées à être appliquées dans un autre contexte et auprès d'un autre public que celui prévu initialement. Pour valider que les cartes remplissent bien leurs objectifs, c'est-à-dire qu'elles sont efficaces, les cartographes conduisent des expérimentations orientées utilisateurs.

Depuis une vingtaine d'années, ces méthodes expérimentales s'enrichissent des approches existantes dans le domaine de la psychologie cognitive (Andrienko et al., 2008; Fabrikant et Lobben, 2009). Basées sur des approches quantitatives standardisées, la psychologie expérimentale fournit un cadre, qui a ensuite été adapté dans le domaine de la cartographie.

3.1. Principes de psychologie expérimentale

3.1.1. La méthode expérimentale

D'après la définition de (Grawitz, 2000, cité dans Catanas, 2002), « l'expérimentation est une observation provoquée portant sur une situation créée et contrôlée par le chercheur, qui a pour but de valider (ou invalider) une ou des hypothèses issues d'un système théorique ». Les points importants pour mener à bien l'expérimentation sont donc d'avoir « des hypothèses issues d'un système théorique » et une « situation contrôlée ».

En psychologie, l'expérimentation consiste à observer les réponses comportementales d'individus pour comprendre le fonctionnement et les traitements de l'esprit humain (Nicolas et al., 2007). La méthode de la psychologie expérimentale se décompose en 4 étapes explicitées sur la Figure 3.16 : l'*observation* des faits conduit à formuler une *hypothèse* sur un comportement, hypothèse qui est ensuite vérifiée au cours d'une *expérimentation*, dont les

résultats sont *interprétés* pour en tirer des conclusions.

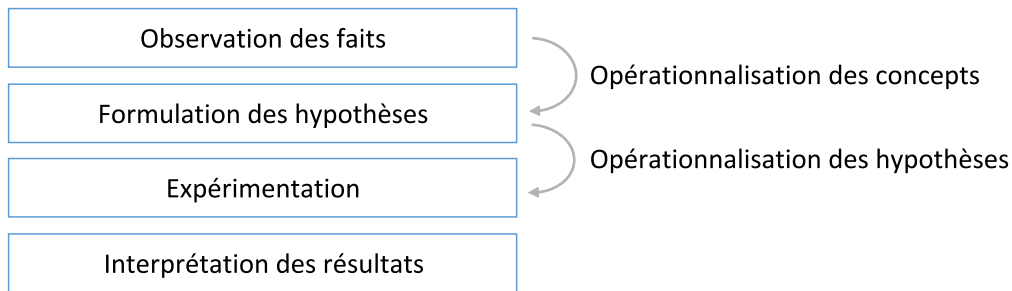


Figure 3.16. Etapes de la méthode expérimentale en psychologie (d'après Nicolas et al., 2007)

Une hypothèse est une « affirmation prédictive » de la forme : « la variable X devrait produire l'effet Y » (Catanas, 2002). L'expérimentation vise à tester une ou plusieurs *variables*, c'est-à-dire des paramètres qui varient selon plusieurs modalités. L'hypothèse va être testée expérimentalement en faisant varier la situation de test (environnement, tâche, stimulus) et/ou la catégorie d'individu qui opère (ex : personne jeune ou âgée, novice ou expert) (Nicolas et al., 2007).

L'opérationnalisation des hypothèses consiste à transformer les paramètres de l'hypothèse en *facteurs* unitaires, qui vont être mesurables en pratique. La variation du phénomène observé est mesurée par une *variable dépendante* (sous-entendu, dépendante du phénomène observé) (ex : test de mémoire – variable dépendante : nombre de mots mémorisés).

L'expérimentateur va ensuite manipuler des facteurs qui influencent le phénomène observé : on les appelle les *facteurs principaux*. Ils sont mesurés en pratique par des *variables indépendantes*, dont l'expérimentateur va faire varier la valeur et observer l'effet sur la variable dépendante (Légal, 2010). Plusieurs facteurs principaux peuvent varier en même temps, leurs interactions devront alors être étudiées lors de l'interprétation des résultats.

Il existe des sources de variation de l'environnement, qui peuvent influencer les résultats mais qui ne sont pas destinées à être testées : on les appelle *facteurs secondaires*. La variabilité provenant de ces facteurs secondaires doit être contrôlée durant l'expérience, pour éviter qu'elle introduise de l'erreur dans les valeurs des variables testées : l'expérimentation doit être en situation contrôlée (Hall, 1998). On peut s'affranchir de l'effet des facteurs secondaires soit en les systématisant, c'est-à-dire en les maintenant constants pour tout le monde, soit en les randomisant, c'est-à-dire en les forçant à varier aléatoirement (Nicolas et al., 2007). Par exemple, si l'expérience se déroule en plusieurs sessions successives impliquant des participants différents, l'environnement de test, l'ordre des étapes suivies et la personne qui fait passer le test doivent être les mêmes pour chaque session.

3.1.2. Les plans d'expérimentations

Les expérimentations en psychologie peuvent suivre plusieurs types de protocoles (Hall, 1998; Wikipedia, 2015a) :

- Le plan d'expérience croisé (plus connu sous son nom en anglais : *within-subject design*) consiste à confronter tous les sujets à plusieurs modalités de la variable indépendante. Par exemple, si l'expérimentateur veut tester deux modalités d'une variable indépendante selon ce plan, chaque sujet testera d'abord l'une des modalités et ensuite l'autre.
- Le plan d'expérience emboîté (*between-groups* ou *between-subjects factorial design*) consiste à répartir les sujets dans des groupes qui subissent des modalités de variable différentes. Lorsqu'il y a deux groupes, on compare parfois un groupe dit « traité » (condition spéciale) et un groupe « contrôle » (condition neutre). Ce design est habituellement utilisé lorsqu'il y a plus d'une variable indépendante. Le maximum testé habituellement est 3 variables indépendantes : au-delà, l'analyse des résultats devient trop complexe.
- Le plan d'expérience mixte (*mixed factorial design*) combine les approches *within-subject* et *between-groups*. Il s'applique à plusieurs variables testées, certaines classées en *within-subject* et d'autres classées en *between-groups* (ex : tester les modalités d'un caractère pour la population entière (*within-subject*), puis les différences entre 2 groupes dans cette population (*between-groups*) ; tester l'effet de différentes modalités d'un traitement médical (*between-group*) en testant les mêmes individus avant et après le traitement (*within-subject*)).

Chacun de ces protocoles possède des forces et des faiblesses. Les avantages et inconvénients des approches « *within-subject* » et « *between-groups* » sont présentées dans le Tableau 3.3. Le plan d'expérience mixte combine les forces et faiblesses des deux autres.

Tableau 3.3. Forces et faiblesses des plan d'expérience « *within-subject* » et « *between-group* » (d'après (Hall, 1998; Wikipedia, 2015a))

	Forces	Faiblesses
Within-subject	<ul style="list-style-type: none"> • Réduit l'erreur due aux différences entre individus, les conditions étant exactement les mêmes pour le test des deux modalités (ex : les individus qui ont mal dormi la nuit précédente sont du même effectif pour les deux modalités). • Augmente le pouvoir statistique et diminue la probabilité d'erreur, en augmentant le nombre d'individus qui teste chaque modalité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Effet de report : La participation dans une condition peut affecter la participation à une autre condition, donc créer un autre variable qui va évoluer avec la variable indépendante. Deux effets de reports classiques : la fatigue (effet négatif) et l'apprentissage (effet positif). • Ne permet de tester qu'une seule variable indépendante.

	Forces	Faiblesses
Between-groups	<ul style="list-style-type: none"> • Des variables multiples ou de multiples niveaux de variables peuvent être testés en même temps. • Economie de temps car plusieurs modalités peuvent être testées lors de sessions parallèles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requier un plus grand nombre de participants pour pouvoir réaliser des tests statistiques. • Peut engendre un biais entre groupe contrôle et groupe traité, dû soit aux sujets s'ils savent dans quel groupe ils sont, soit aux expérimentateurs qui attendent un résultat spécifique d'un des deux groupes. • Peut engendrer un biais si les sujets partageant un profil ne sont pas assignés en proportions homogènes entre les groupes. Ou, si l'homogénéité est trop contrôlée (ex : même âge, genre et niveau d'étude), peut empêcher de généraliser les résultats à une population plus grande. • Des variables environnementales (ex : deux expérimentateurs avec des comportements différents) peuvent influencer les résultats.

Les modes opératoires des protocoles en psychologie expérimentale ont été adaptés par la Recherche en cartographie, pour évaluer les modalités de représentations cartographiques.

3.2. Protocoles expérimentaux utilisés en cartographie

En cartographie, les expérimentations auprès d'utilisateurs visent le plus souvent à évaluer la lisibilité des cartes, dans l'objectif de faciliter la lecture des signes cartographiques. La plupart des expérimentations mesurent « la vitesse ou la précision des sujets à accomplir des tâches dans un ensemble graphique ou visuel » (Castner, 1983; traduit par Chesneau, 2006). L'analyse des protocoles expérimentaux utilisés en cartographie peut nous aider à bâtir notre propre protocole d'évaluation.

3.2.1. Démarche expérimentale

Le test d'une carte ou d'une interface de géovisualisation a souvent pour but de mesurer des indices indirects qui témoignent de la facilité du raisonnement, afin de savoir si la carte est facile à lire et/ou à manipuler. En visualisation d'information, on dit qu'une représentation graphique est efficace si elle est plus rapide à interpréter, si elle permet de tirer plus de conclusions ou si elle conduit à faire moins d'erreurs qu'une autre représentation.

Dans un état de l'art sur les expérimentations de visualisation de l'incertitude dans les cartes, Kinkeldey et al. (2014) listent quatre modes de passation d'expérimentations en

cartographie :

- l'expérimentation de laboratoire,
- l'expérimentation web,
- l'entretien et
- le focus group.

Les deux premières méthodes peuvent donner lieu à des analyses quantitatives, tandis que les deux dernières donnent plutôt lieu à des analyses d'ordre qualitatif.

Dans une expérimentation de laboratoire, les participants sont convoqués dans un lieu défini aux conditions environnementales contrôlées. L'expérimentateur est souvent présent pour donner les consignes relatives à la session de test et surveiller que le test se déroule conformément aux conditions prévues. Les sessions de tests peuvent être individuelles ou en groupe.

Un avantage de cette méthode est que les conditions de test peuvent être contrôlées en détail et donc les résultats interprétés sans ambiguïté. Des mesures physiologiques peuvent également être réalisées sur les participants, comme l'enregistrement oculométrique (technique qui sera détaillé dans la suite de cette section). L'inconvénient est que ce dispositif est coûteux en ressources humaines (expérimentateur présent pendant toute la durée du test) et potentiellement financièrement (location des locaux, du matériel...).

L'expérimentation web consiste à diffuser un questionnaire via internet, auxquels les participants répondront par l'intermédiaire de leur navigateur internet. Le principal avantage est de pouvoir capter un nombre de participants plus grand que les expérimentations en présentiel, potentiellement à moindre coût. L'inconvénient majeur est qu'il n'est pas possible de connaître les conditions dans lesquelles les participants ont répondu, le sérieux de leur réponse, leur degré de concentration, s'ils ont répondu une fois ou plusieurs fois aux questions... Les résultats de ce type d'étude doivent donc être analysés avec précaution.

L'entretien rassemble un expérimentateur, qui endosse le rôle d'interviewer, et un participant, qui répond à une série de questions. Les entretiens peuvent être (Blanchet et al., 1985) :

- directs, cas dans lequel les réponses des participants sont guidées par les questions de l'expérimentateur,
- libres, lorsque l'expérimentateur intervient le moins possible dans la conversation et laisse les participants s'exprimer sur un sujet sans anticiper leurs réponses,
- ou semi-directifs lorsqu'ils combinent les deux méthodes.

L'inconvénient de l'entretien est que c'est une méthode coûteuse en temps de passation, puisque les participants sont souvent interrogés individuellement, mais aussi en temps d'analyse car les résultats obtenus correspondent à du langage naturel, qui doit ensuite être retranscrit à l'écrit puis analysé qualitativement. L'un de ses avantages est qu'il permet souvent d'explicitier des comportements ou des opinions et, à ce titre, peut permettre d'expliquer des résultats quantitatifs. Il peut également permettre de révéler des résultats

non-anticipés par l'expérimentateur.

Le *focus group*, ou groupe de discussion, réunit plusieurs individus partageant des caractéristiques culturelles, sociétales ou idéologiques afin de collecter leur opinion par rapport à un produit, un service ou un concept. Majoritairement basée sur la discussion entre les membres du groupe, les résultats issus de cette méthode reflètent l'interaction entre les attitudes des participants, en plus de leurs opinions individuelles.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de gagner du temps par rapport aux entretiens individuels, tout en parvenant à collecter les avis de plusieurs personnes. Les résultats obtenus sont généralement enrichis qualitativement et quantitativement grâce aux interactions et aux discussions du groupe. Les inconvénients, comme pour les entretiens individuels, sont le temps nécessaire à l'analyse des données qualitatives collectées et la subjectivité de l'évaluation émise par les participants. Le résultat de ces entretiens de groupe peut aussi être perturbé par des phénomènes sociaux tels que l'effet de consensus, dans lequel les participants adhèrent à l'opinion émise par un leader et n'expriment pas leur propre point de vue.

3.2.2. Types de tâches

Lors d'une expérimentation de laboratoire ou une expérimentation web dans le domaine de la cartographie, les participants doivent généralement réaliser un ensemble de tâches, pendant que l'expérimentateur enregistre leur performance au moyen de mesures ou d'indicateurs. Deux types de tâches sont communément proposées (Kinkeldey et al., 2014) :

- les évaluations objectives, pour lesquelles on peut mesurer l'exactitude des réponses,
- les évaluations subjectives, qui regroupent des tâches d'auto-évaluation du ressenti des participants.

Parmi les tâches objectives, Kinkeldey et al. citent par exemple :

- « retrouver une valeur parmi un ensemble », ce qui donne des informations sur la lisibilité des attributs de la carte,
- « agréger des valeurs dans une zone », qui informe sur la capacité du participant à réaliser une estimation globale à partir d'une distribution de valeurs,
- « donner une note aux valeurs de symboles, sans légende », qui informe sur la précision du jugement relatif des valeurs les unes par rapport aux autres,
- « comparer différentes entités »,
- « ordonner des entités selon leur valeur »,
- « rechercher des entités ayant certaines caractéristiques », qui comprend la « recherche de motifs » (isoler un groupe de valeurs plus élevées ou plus faibles),
- « compter les entités ayant certaines caractéristiques ».

Il est possible de déterminer objectivement si les réponses à ces questions sont vraies ou fausses, ce qui permet d'observer si la représentation cartographique testée permet réellement d'atteindre l'objectif attendu.

Les tâches subjectives peuvent évaluer la confiance dans une réponse, la préférence de l'utilisateur pour une certaine technique, la facilité d'utilisation de la carte, le jugement de l'attractivité du design, l'intuitivité des symboles utilisés ou encore les difficultés rencontrées (Kinkeldey et al., 2014). L'évaluation des tâches subjectives passe le plus souvent par des formulaires du type :

- Choisir une réponse parmi une liste d'options (ou sur une échelle de Likert³⁶),
- Donner une note (par exemple, sur une échelle de 1 à 100),
- Rédiger une réponse libre à une question.

Les résultats de tâches subjectives peuvent donner lieu à des analyses qualitatives (ex : analyse du contenu de textes) aussi bien que quantitatives (statistiques, relations avec d'autres variables quantifiées, etc.). Généralement, elles sont mises en relation avec les mesures d'efficacité de la lecture, qui sont présentées dans le paragraphe suivant.

3.2.3. Mesures

Dans les expérimentations en cartographie, les variables dépendantes les plus utilisées pour mesurer l'efficacité de la lecture d'une carte sont le temps de réponse et le taux de bonnes réponses (Kinkeldey et al., 2014, p. 377). Il est également courant de demander aux participants d'évaluer leur confiance dans leurs réponses, l'intuitivité de l'interface ou de faire part de leurs préférences de design (*ibid*). Pour cela, plusieurs modalités de collecte de données sont combinées, notamment des sessions formelles, quantitatives, et des entretiens qualitatifs.

Des méthodes existent pour mieux comprendre le mode de lecture et de raisonnement des utilisateurs, comme par exemple l'oculométrie cognitive (Fabrikant et al., 2008a; Henderson et Hollingworth, 1998) ou l'enregistrement des traces d'utilisations logicielles (Choquet et Iksal, 2007; Jansen, 2008).

L'oculométrie utilise un outil appelé oculomètre, qui enregistre les points de fixation des yeux des lecteurs sur la carte ou dans l'interface de géovisualisation (Fabrikant et al., 2008a). Cette méthode est aujourd'hui régulièrement utilisée dans les tests d'interfaces cartographiques (e.g. Fabrikant et al., 2008b; Opach et al., 2014; Palka, 2015). L'analyse quantitative du nombre de fixation, de la durée de fixation, de l'ordre des zones fixées et de la durée avant la première fixation peuvent permettre d'expliquer pourquoi certains participants sont plus performants que d'autres pour réaliser certaines tâches (Çöltekin et al., 2010), notamment en corrélant vitesse d'exécution et chemin du regard sur l'écran.

Les traces d'utilisation (en anglais *interaction logs*) sont des enregistrements de la séquence d'interactions réalisées par l'utilisateur (clics, affichage de fenêtres, export de données, etc.).

³⁶ Une échelle de Likert (du nom de son créateur) est une échelle de jugement par laquelle la personne interrogée exprime son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation, du type : tout à fait d'accord, plutôt d'accord, ..., pas du tout d'accord. (Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_de_Likert)

Elles peuvent par exemple permettre de déterminer quelles fonctionnalités de l'interface sont les plus utilisées, quelles données sont les plus consultées, ou quelles sont les séquences d'actions les plus nombreuses pour résoudre un problème, ce qui renseigne sur les stratégies d'exploration des participants (Jansen, 2008). Plus utilisées dans d'autres disciplines, les traces d'utilisation sont encore peu répandues dans les protocoles cartographiques et font actuellement l'objet de développements méthodologiques (Ooms et De Maeyer, 2015).

La description de ces méthodes nous permet de conclure que la combinaison de mesures qualitatives issues de l'oculométrie ou des traces d'utilisation aux mesures quantitatives, les plus fréquemment utilisées, semble pouvoir expliquer les résultats quantitatifs d'efficacité.

3.2.4. Participants

Les utilisateurs de visualisations ne sont pas un public homogène. Il est reconnu que certaines présentations visuelles seront plus adaptées à certains publics qu'à d'autres, en raison de leurs besoins et de leurs connaissances qui diffèrent. En géovisualisation, les études distinguent souvent (Cliburn et al., 2002; Davies, 2015; Kinkeldey et al., 2014) :

- les experts thématiques (ou scientifiques), qui sont spécialistes du domaine représenté,
- les experts en informatique (ou en logiciels), qui sont plus à l'aise dans la manipulation de visualisations dynamiques,
- les experts en cartographie, qui sont habitués à lire et à manipuler des cartes,
- les utilisateurs d'information spatiale (pas forcément sous forme cartographique),
- les utilisateurs novices, qui ne sont experts dans aucune des catégories susmentionnées,
- les décideurs politiques, dont les choix peuvent avoir des répercussions importantes.

Les caractéristiques individuelles de chaque participant peuvent également influencer les comportements de lecture de carte et donc les résultats des expérimentations. Ces paramètres constituent des facteurs secondaires, non destinés à être testés. Il est donc utile de les identifier pour contrôler leur influence sur les résultats.

Il a notamment été démontré que certaines capacités cognitives influencent la lecture et la résolution de problèmes (Davies, 2015) :

- le temps de réaction,
- l'acuité visuelle,
- la mémoire de travail visuo-spatiale,
- le suivi de mouvement (effet qui peut être gommé par l'entraînement),
- la mobilité du regard (peut être influencée par la pratique de jeux vidéos),
- l'adaptation à l'obscurité,
- la sensibilité aux contrastes,

- la sensibilité à l'éblouissement,
- la concentration de l'attention,
- le rappel de souvenirs,
- la rapidité d'exécution,
- la capacité au multitâche,
- le repos sur l'expérience plus que sur la collecte d'informations,
- les compétences sociales.

L'évaluation de ces capacités, préalablement au test, permet de connaître et maîtriser ces facteurs secondaires.

Les participants aux expérimentations en cartographie peuvent également être catégorisés selon leurs caractéristiques démographiques, telles que leur âge, leur genre ou leur catégorie socio-professionnelle (Kinkeldey et al., 2014). Il a en particulier été démontré que l'âge a une forte influence sur les capacités cognitives listées par Davies (2015), qui tendent à diminuer à partir d'une vingtaine d'années (Salthouse, 2009).

Cependant, les caractéristiques démographiques sont rarement corrélées aux mesures réalisées pendant les expériences et elles varient d'une expérimentation à l'autre (Kinkeldey et al., 2014). Par ailleurs, dans de nombreuses expérimentations, les panels de participants sont souvent composés d'étudiants en cartographie, qui ne représentent qu'une faible part des publics auxquels les cartes peuvent s'adresser. Cela rend délicat la généralisation des résultats à l'ensemble des publics (*ibid*).

Selon le type de méthode expérimentale, le nombre de participants impliqués dans les expérimentations en cartographie varie beaucoup. Les méthodes qualitatives, telles que les entretiens et les focus group, mobilisent généralement moins de 20 participants (Kinkeldey et al., 2014). Les méthodes quantitatives, en revanche, mobilisent en moyenne 30 participants pour les expérimentations de laboratoire et 82 participants pour les expérimentations web (le maximum recensé par Kinkeldey et al. s'élevant à 274 participants).

3.3. Implications pour notre cas d'étude

La mise en œuvre de protocoles standardisés limite le risque d'erreurs dans l'interprétation des résultats et permet, a priori, de généraliser les résultats au-delà du cas d'étude testé.

Pour mettre en place une expérimentation qui permette de valider nos propositions, voici les points auxquels nous veillerons en particulier :

- Le choix d'un plan d'expérimentation approprié aux variables qui doivent être testées (ex : *within-subject* ou *between-group*),
- L'importance de considérer des mesures objectives, mais la possibilité de faire appel à des mesures subjectives pour recueillir le ressenti des participants,

- L'intérêt de combiner des mesures quantitatives (ex : temps de réponse, précision,...) et qualitatives (ex : oculométrie, opinion des participants,...), les secondes permettant souvent d'expliquer les premières,
- L'importance de tenir compte des caractéristiques individuelles des participants (niveau d'expertise, caractéristiques démographiques, capacités cognitives) qui peuvent influencer les résultats.

Les protocoles d'évaluation en cartographie font aujourd'hui encore l'objet de développements et d'évolutions, notamment en proposant des méthodes nouvelles issues d'autres disciplines (par exemple, l'analyse de la conductance de la peau comme indicateur de stress (S. M. R. Maggi et Fabrikant, 2014)). Les protocoles ne sont donc pas figés et l'intégration de nouvelles variables pour évaluer l'efficacité de nos propositions reste possible.

4. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons vu que la prise en compte de l'utilisateur est capitale en cartographie, puisqu'elle amène à modifier les représentations cartographiques, pour en concevoir des versions plus intuitives et plus adaptées aux usages.

Tout d'abord, la réception du message cartographique par l'utilisateur joue un rôle important. Le message cartographique, correspondant à la représentation mentale du territoire par le cartographe, peut ne pas être interprété de la même façon par l'utilisateur, notamment en fonction de ses connaissances et expériences antérieures et de sa compréhension du système de symboles (cf. section IV.1). Pour limiter le risque que le message soit mal reçu ou mal compris, le cartographe peut notamment recourir à :

- la prise en compte de règles de cartographie standardisées,
- l'adjonction d'éléments annexes à la carte portant des fonctions de communication (titre, légende, carton de localisation),
- la considération des besoins et des représentations de l'utilisateur.

La prise en compte de l'utilisateur peut aussi passer par la prise en compte de ses capacités cognitives. La connaissance des mécanismes selon lesquels l'humain détecte, stocke et mobilise des connaissances permet d'émettre des préconisations de designs cartographiques, tels que synthétisés dans la section IV.2.5.

Enfin, il est utile d'impliquer l'utilisateur dans l'évaluation des produits cartographiques. La psychologie expérimentale et l'élaboration de méthodes expérimentales en cartographie constituent des boîtes à outils susceptibles d'aider à construire cette évaluation.

La prise en compte de l'utilisateur intervient donc avant, pendant et après la production de la représentation cartographique. Cette formalisation en trois étapes est à la base de la « sémiologie graphique expérimentale » (Serrhini, 2000), méthode d'implication de

l'utilisateur dans le processus de création cartographique, qui passe par trois phases :

- la concertation,
- la composition de la carte et
- la validation.

Nous pouvons enrichir ce schéma en y ajoutant la prise en compte des fondements théoriques issus de la psychologie expérimentale, ce qui aboutit au schéma illustré sur la Figure 3.17.

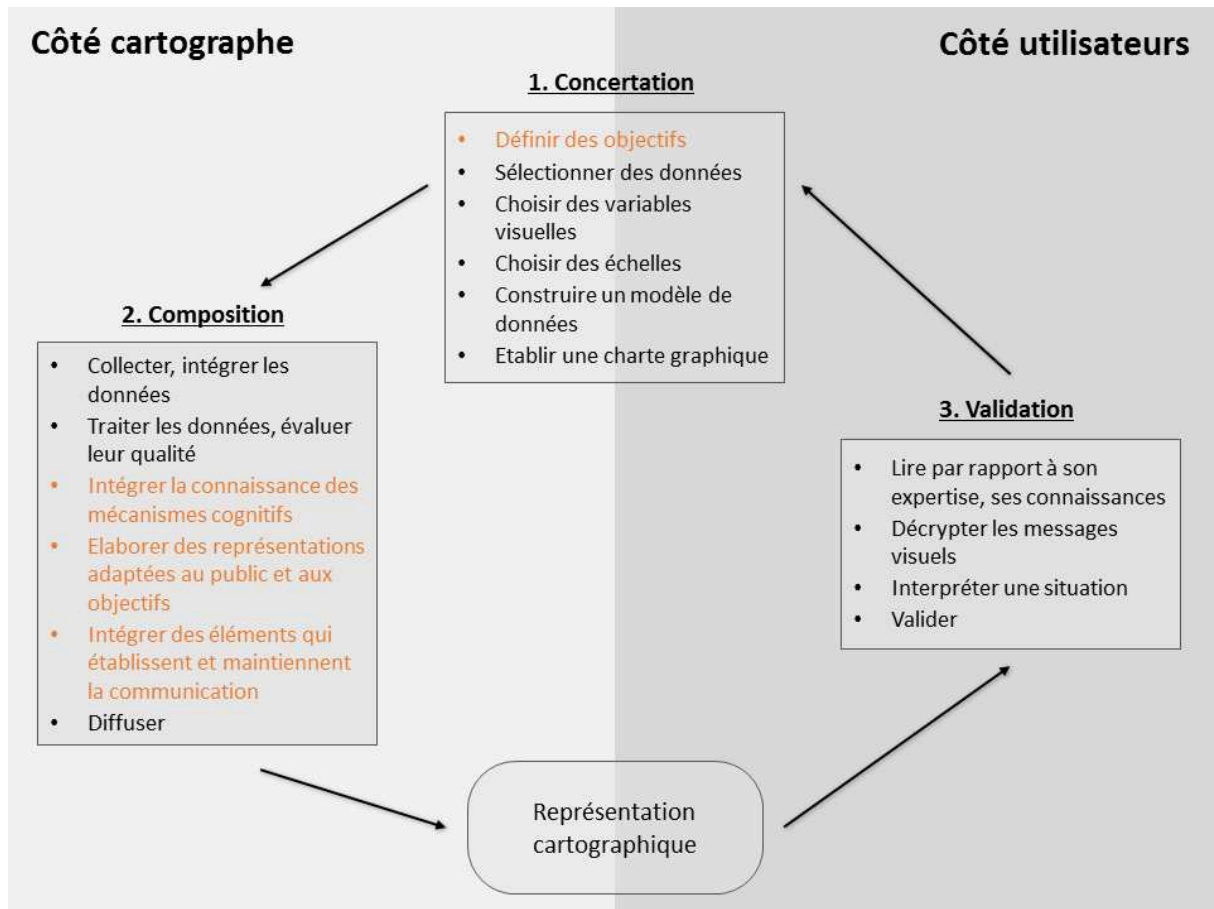


Figure 3.17. Modèle du processus de création de cartes impliquant les utilisateurs. Repris et complété à partir de (Graziano, 2009, p. 43) (les modifications par rapport au schéma initial sont indiquées en orange)

Dans notre optique de construire une carte de récit des inondations historiques, ces avancées de l'état de l'art seront intégrées pour aboutir à une interface de géovisualisation adaptée aux utilisateurs. Il manque cependant une dimension à étudier pour construire cette interface : celle du récit et de la dynamique des événements.

Le récit est intégré à la fois dans le temps et dans l'espace. La question se pose donc de savoir s'il existe des modes de visualisation efficaces pour représenter la dimension temporelle dans la carte. On peut par ailleurs se demander si la lecture et la compréhension d'un récit ne font pas appel à des mécanismes cognitifs spécifiques et comment la prise en

compte de ces mécanismes pourrait enrichir les représentations cartographiques et l'interface de géovisualisation. C'est l'objet du chapitre suivant.

V/ Cartographie de données temporelles

L'étude de l'inscription spatiale des événements de risques naturels, tels que les inondations, est aussi importante que l'étude de leur évolution dans le temps. On peut par exemple étudier un phénomène de risque naturel à travers : sa fréquence d'apparition, sa vitesse de diffusion, la durée d'un épisode, son évolution temporelle ou l'historique des événements (Davoine, 2014). A la suite d'un événement de risque, la gestion de la crise s'inscrit elle-même dans l'espace et dans le temps. D'une part, l'expert va identifier les zones vulnérables à fort enjeu qu'il va falloir secourir en premier ordre, et les espaces ressources, utiles à la gestion de crise (D'Ercole et al., 2012). D'autre part, l'organisation des secours et les prises de décision suivent un ordre temporel qui dépend des enjeux et des priorités (Davoine, 2014).

Les travaux cartographiques se sont de tous temps intéressés à la représentation conjointe du temps et de l'espace, pour expliquer les processus actifs ou passés ayant contribué aux situations observables aujourd'hui (Cheylan, 2007). Ces études se sont toutes heurtées à la difficulté de représenter conjointement ces deux dimensions de l'information. En effet, comme nous l'avons évoqué dans la section II.1.1.4, visualiser les dimensions spatiales (2D), temporelle et thématique de l'information revient à visualiser quatre dimensions, alors que la carte ne permettrait en théorie d'en visualiser efficacement que trois (Bertin, 1967). De plus, l'analyse des phénomènes spatio-temporels doit composer avec des temporalités variées et des échelles spatiales et temporelles imbriquées, dont la formalisation et la visualisation soulèvent des verrous méthodologiques.

La question de représenter des évolutions temporelles dans les cartes n'est pas nouvelle. De nombreuses solutions ont été proposées au cours de l'Histoire, qui permettent de raisonner sur l'espace et le temps de manière très efficace. Historiquement, deux approches se sont attachées à décrire les processus spatio-temporels : celle des géographes, centrée sur l'espace, considère que les entités observées sont spatiales et observe comment le temps les fait évoluer ; celle des historiens, centrée sur le temps, considère des entités temporelles et représente leur localisation dans l'espace (Kaddouri et al., 2014, p. 12). Les travaux actuels en visualisation d'informations cherchent à dépasser cette dualité où temps et espace sont pris comme deux dimensions indépendantes, pour les unifier dans un modèle 4D (*ibid*).

Ce chapitre présente un état de l'art relatif aux représentations graphiques et cartographiques du temps. La première section aborde les concepts relatifs à la description du paramètre temps, des temporalités et des dynamiques dans le domaine de la visualisation d'information. La deuxième section présente les approches existantes en cartographie, des legs historiques à la cartographie dynamique, et les résultats d'évaluation de ces modes de visualisation auprès d'utilisateurs. La troisième section expose l'apport des autres disciplines de visualisation d'informations dans la représentation graphique du temps, qui peuvent enrichir les approches cartographiques en s'intégrant dans l'environnement de géovisualisation. La quatrième section aborde le cas particulier des représentations cartographiques de récits, en présentant les notions liées au récit, à sa perception et sa

compréhension, et les représentations cartographiques existantes.

1. Formalisation du temps et des dynamiques

La visualisation des dynamiques des phénomènes géographiques nécessite de formaliser ou cadrer les concepts relatifs à leurs caractéristiques spatio-temporelles. Le temps peut sembler plus difficile à définir et à caractériser que l'espace. Etant donné son caractère immatériel, on ne peut l'observer directement qu'à travers ses effets.

En cartographie, la prise en compte du temps se réduit fréquemment à représenter les dates des phénomènes, dans un schéma temporel linéaire. Cependant, la prise en compte d'autres temporalités et conceptions du temps peut éclairer l'analyse. La littérature scientifique fournit une grille de lecture des concepts associés d'une part au temps et d'autre part aux processus dynamiques.

1.1. Similarités entre le temps et l'espace

Les données géographiques ont des caractéristiques propres qui les différencient des autres types de données. Mais certaines de ces caractéristiques peuvent être rapprochées des données temporelles.

Les données spatiales et temporelles sont toutes deux localisées dans un référentiel : les premières, par des coordonnées selon une projection cartographique et les secondes, par une date selon un calendrier.

Le temps est par nature continu mais il peut être discrétisé pour l'analyse. Cette distinction se rapproche de l'opposition entre approches raster et vecteur pour les données géographiques (Klein, 2007, p. 19).

Les relations entre objets, dans l'espace, peuvent être décrites selon des relations soit euclidiennes, soit topologiques. Par analogie, le référencement relatif d'objets dans le temps peut se faire de façon quantitative (échelle d'intervalles ou de rapport) ou qualitative (avant, pendant, après) (Klein, 2007, p. 19).

Comme pour les données spatiales, les données temporelles obéissent à la première loi de Tobler : « chaque objet interagit avec tous les autres, mais les objets proches sont plus reliés que les objets distants » (Tobler, 1970, p. 236). Cette relation fournit des opportunités pour le traitement et l'analyse des données (Andrienko et al., 2010) : la possibilité de faire des interpolations pour reconstituer les données manquantes, l'intégration d'informations de types et de sources différentes grâce au partage de localisations ou de dates, l'inférence de caractéristiques des données, etc.

Bien sûr, ces relations temporelles comme spatiales ne sont pas absolues. Des barrières peuvent interrompre la continuité des phénomènes, qu'il s'agisse de barrières naturelles dans l'espace, telles que des montagnes, ou d'événements remarquables dans le temps,

comme un ouragan ou une éruption volcanique (Andrienko et al., 2010).

L'espace et le temps ont plusieurs granularités (km, m, cm VS année, mois, jour, heure...) et plusieurs échelles (locale, intermédiaire, globale VS temps court, temps long).

La granularité et l'échelle choisies pour mesurer et pour analyser les phénomènes ont un impact sur les observations qui en seront faites : les observations réalisées à une échelle peuvent ne pas être visibles à une autre échelle. Par exemple, les motifs temporels et les corrélations ne seront pas les mêmes selon qu'on analyse le développement des cultures sur une échelle en jours ou bien en degrés-jours ou encore que les activités humaines soient analysées en jours ou en jours travaillés (Andrienko et al., 2010). L'échelle et la granularité temporelles à considérer sont donc également dépendantes du phénomène étudié.

1.2. Formalisations du temps

Tantôt comparé à l'espace, tantôt considéré comme une caractéristique tout à fait originale, la littérature s'accorde à reconnaître au temps certaines caractéristiques, décrites ci-après.

1.2.1. Temps continu ou discret

Le temps est continu, il s'écoule sans s'interrompre. Mais les outils de mesure ne saisissent les phénomènes qu'à une certaine granularité (une mesure toutes les heures, minutes, secondes, millisecondes, ...). Même le plus fin des pas de temps ne peut qu'approcher la série continue (Cheylan, 2007). Si le pas de temps est assez fin relativement à l'échelle du phénomène décrit par la donnée, alors la série de données peut être considérée comme *continue* dans le temps. Si le modèle de données considère plutôt une série d'intervalles temporels qui segmentent le temps en unités, alors le temps est considéré comme *discret*.

La localisation des objets dans le temps suit cette dualité d'échelles. Les objets peuvent être référencés temporellement selon des *instants*, entité temporelle ponctuelle de dimension 0, ou selon des *intervalles* ou périodes, entités temporelles de dimension 1, qui ont une étendue (Andrienko et al., 2010). Une même date, telle que « le 14 juillet », peut être considérée comme un instant ou comme un intervalle, selon l'échelle à laquelle se place l'étude.

1.2.2. Temps linéaire, cyclique ou embranché

Dans la culture occidentale, le temps est souvent considéré comme *linéaire* : il est constitué d'une succession d'instant et de durées et cette ligne ordonnée est unique. Mais le temps peut aussi être considéré comme *cyclique* : cycle des saisons, des migrations alternantes, des phases lunaires, des activités de la journée... et la répartition des phénomènes temporels peut être observée au regard de ces cycles (Blaise et Dudek, 2013; Cheylan, 2007).

Selon Klein (2007, p. 16), le temps linéaire est souvent utilisé pour décrire des changements

géographiques lents et irréversibles, inscrits dans le long-terme. A l'inverse, le temps cyclique décrit des changements rythmés, réguliers et mesurables sur une échelle relativement courte (quotidienne, annuelle).

Dans le domaine de la simulation ou de l'élaboration de scénarios sur le futur ou le passé, le temps devient *embranché* (Cheylan, 2007) : plusieurs lignes temporelles possibles coexistent. Enfin, le temps peut être décrit selon des *lignes parallèles*, qui représentent des points d'observation multiples et synchronisés sur un même phénomène (Andrienko et al., 2010).

1.2.3. Temps absolu ou relatif

Le temps suit un ordre irréversible : des événements survenus à des moments différents sont objectivement ordonnés (l'un vient après l'autre). L'ordre peut être enregistré en rattachant un objet à sa *date absolue* dans un système calendaire. Mais parfois, le rattachement à un temps absolu n'est pas possible : par exemple, si on considère une pièce de monnaie de 1237 et une céramique du XIIIe siècle, il est impossible de décider de l'antériorité ou de la postériorité de la création de la céramique (Cheylan, 2007). On peut alors recourir à un *référencement relatif* des objets temporels selon des intervalles ordonnés, en recourant par exemple aux relations d'Allen (1983) (Figure 3.18) : la pièce de monnaie date de *pendant* la période de la céramique, la période de la céramique *contient* la pièce de monnaie.

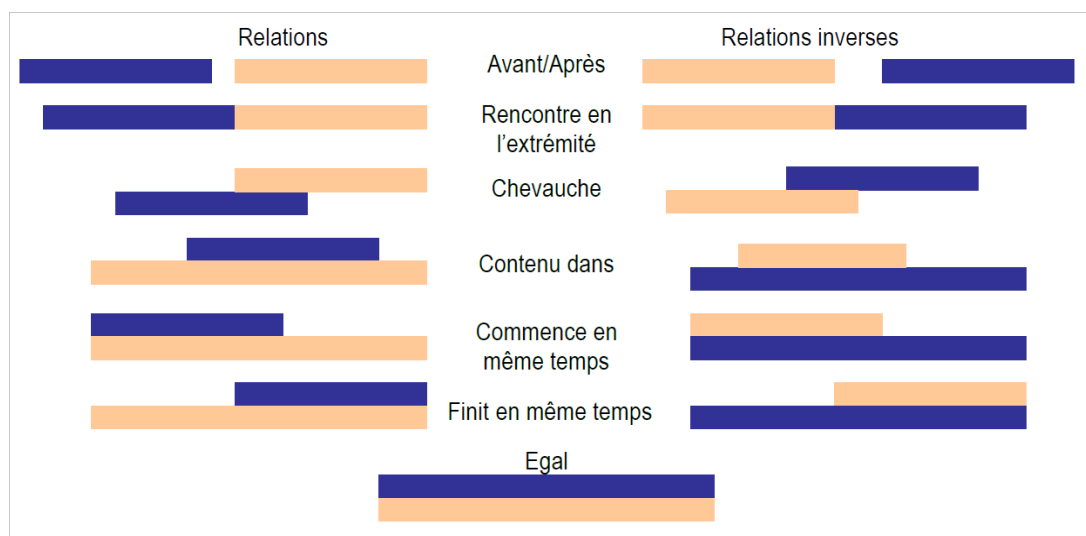


Figure 3.18. Les treize relations d'Allen entre deux intervalles temporels (Allen, 1983) (Source image : Arnaud, 2009)

1.2.4. Temps emboîtés

L'observation des phénomènes communiqués par la carte peut être envisagée selon des temps emboîtés (Veyret, 2004; Arnaud, 2009) :

- le temps court qui est celui de l'instant (rupture de faille sismique, déclenchement du tsunami),
- le moyen terme qui permet de décrire le phénomène (déroulement d'une

inondation, propagation d'une épidémie) et

- le long terme qui regarde la succession entre plusieurs phénomènes du même type (fréquence d'apparition, espacement régulier ou aléatoire) ou de types différents (ordre des phénomènes, synchronisations).

Le temps peut être analysé selon ces multiples échelles, ce qui aura une incidence sur les observations du phénomène qui pourront être réalisées.

1.2.5. *Le temps comme distance*

Le temps peut être conçu comme une distance entre deux points de l'espace, à travers les notions de vitesse de déplacement (Cauvin et al., 2008b, p. 165). Dans cette conception, l'espace n'est plus structuré par l'éloignement géographique entre les lieux mais par le temps mis pour parcourir ces distances. Cette approche est notamment utilisée dans les études sur l'accessibilité des territoires.

L'analyse du paramètre temps, affectant les entités spatiales, peut donc être enrichie de nombreuses conceptions, au-delà du temps linéaire absolu : temps cyclique, embranché ou en perspectives parallèles, à référencement relatif, combinant instants et intervalles et plusieurs échelle emboîtées. La combinaison de ces approches peut augmenter le nombre de conclusions extraites des données.

1.3. Les types de temporalités

Etudier un phénomène dans le temps revient à s'intéresser à plusieurs caractéristiques temporelles de ce phénomène, qui sont nommées des *temporalités*. Les temporalités des données géographiques sont les suivantes (Hewitt, 1983) :

- La *date* est le moment d'occurrence d'un événement,
- La *durée* est la longueur de l'intervalle temporel couvert par un ou plusieurs événements,
- La *vitesse* est la rapidité d'exécution d'un événement ou d'un processus ; elle est parfois dénommée *taux de changement* ou *vitesse de modification*,
- La *fréquence* est l'intervalle entre plusieurs occurrences d'un phénomène, dont les manifestations sont récurrentes et régulières,
- La *période de retour* est légèrement différente de la fréquence : elle se traduit par une probabilité d'occurrence sur une période délimitée, souvent exprimée en pourcentage,
- L'*espacement chronologique* est un intervalle de temps entre deux événements.

Selon Arnaud, la durée et la vitesse s'inscrivent dans un temps linéaire, la période de retour dans un temps cyclique tandis que la fréquence et l'espacement chronologique peuvent à la fois s'inscrire dans un temps linéaire et cyclique (Arnaud, 2009, p. 192).

Au-delà de la date, de nombreuses autres caractéristiques temporelles des données peuvent donc être représentées et analysées à travers les cartes.

1.4. Dynamiques spatiales : mouvements et changements

Représenter des phénomènes spatio-temporels signifie représenter la vie d'objets spatiaux (ex : individu, aire urbaine) et/ou temporels (ex : événements) qui composent ce phénomène (Cheylan, 2007). On parle alors de représentation de *dynamiques spatiales*.

Les phénomènes spatiaux affectés par des dynamiques peuvent par exemple être des motifs spatio-temporels (ex : répartition dans le temps et l'espace, trajectoires), des processus (ex : mécanisme de la dérive des continents, étapes de la croissance urbaine) ou des événements (phénomènes localisés et discrets dans le temps, ayant un début et une fin) (Shiple et al., 2013).

Dans les cartes, on traite généralement de façon différente deux catégories de dynamiques (Cheylan, 2007; Kaddouri et al., 2014) :

- Le *mouvement*, dans lequel le temps est intrinsèque à ce qui est représenté. Les mouvements sont eux-mêmes décomposés en deux catégories :
 - les processus de *déplacements d'objets mobiles* (ex : trajectoires d'animaux) et
 - les *flux* (déplacements de quantités – ex : volumes d'exportation).
- Les processus de *changement*, où le temps agit sur l'espace de façon extérieure. Parmi les changements, on peut identifier :
 - *l'apparition* (et la *disparition*) d'objets : reconnaissance de l'existence d'un élément séparable du reste de l'univers (ex : survenue de conflits, ouverture de services),
 - le *changement d'état* : changement des valeurs ou des qualités attribuées aux objets (ex : variation d'occupation du sol, de densité de population),
 - le *changement d'identité* : recomposition des objets par fusion ou éclatement qui modifie leur identité (ex : fusion de communes, scission d'un état) et
 - le *changement de forme* d'un objet (ex : extension d'une ville).

Un même objet peut être affecté par plusieurs de ces dynamiques simultanément : par exemple, un troupeau de mouton, considéré comme un seul objet spatio-temporel, se déplace et change aussi de forme au cours du temps (Cheylan, 2007).

Klein (2007, p. 116) classe ces dynamiques selon la dimension des données qu'elles affectent :

- soit la dynamique affecte la composante spatiale des objets : c'est le cas des changements de localisation, c'est-à-dire les déplacements et les flux, et des changements de forme,
- soit elle affecte la composante thématique de l'information : c'est le cas des changements d'état,

- soit elle affecte ces deux composantes à la fois, ce qui est le cas de l'apparition et dispartition d'objets et des changements d'identité.

Les deux grands types de dynamiques spatiales, le mouvement et le changement, ont fait l'objet de développements méthodologiques et techniques relativement séparés. La recherche sur l'analyse des mouvements s'est en particulier orientée vers la *Time-geography*, qui s'intéresse aux dynamiques de déplacements. Introduite par les travaux d'Hägerstrand (1970), cette discipline propose un « cadre conceptuel, associé à des représentations graphiques des trajectoires individuelles, (...) [pour analyser] l'ordonnancement et la coordination spatio-temporels des comportements humains » (Chardonnel, 2014). Les ponts entre ce courant de recherche et celui propre à l'analyse et la représentation des changements existent mais restent peu nombreux (Andrienko et al., 2003; Gatalsky et al., 2004).

Cartographier des dynamiques signifie donc représenter des mouvements et des changements affectant les composantes spatiales ou thématiques d'entités géolocalisées.

1.5. Synthèse

Les approches formelles du temps sont diverses, mais ne s'opposent pas. Un même intervalle temporel peut par exemple être considéré comme linéaire ou cyclique, notamment en fonction de l'échelle à laquelle il est observé. Ces conceptions du temps témoignent d'une approche adoptée par l'analyste, qui dépend du phénomène en cours d'observation et de l'objectif d'exploration. Elles donnent à voir différentes caractéristiques de l'information et peuvent être combinées aussi loin que cela s'avère pertinent.

Les dynamiques questionnées et la formalisation du temps adoptée dans une géovisualisation ont une influence sur le choix des modes de visualisation à appliquer et des données à confronter dans la carte. A titre d'exemple, l'analyse de Kaddouri et al. (2014, p. 56) sur un corpus de 47 outils de visualisation spatio-temporelle a montré (sans préjuger de leur efficacité de lecture) que les applications qui donnent à voir des changements d'états montrent souvent des données à l'échelle mondiale, sont majoritairement interactives et intègrent souvent des graphiques statistiques synchronisés à la carte. Il est possible de puiser dans les méthodes existantes de visualisation du temps pour identifier des règles ou des tendances qui associeraient une formalisation du temps à un mode de représentation.

Notre travail s'intéresse à la cartographie des événements issus de risques naturels. Les événements de notre cas d'étude, tels que formalisés par l'ontologie IDISFER (cf. section III.4.2.), font plutôt référence à des dynamiques d'apparition (ex : glissement de terrain), de changement d'état (ex : interruption des circulations ferroviaires), voire à des changements de forme (ex : expansion du champ inondé). Dans la suite de ce chapitre, nous nous focalisons donc plutôt sur la représentation de dynamiques de changement, en évoquant tout de même quelques travaux majeurs dans le domaine de l'analyse des

mobilités, qui peuvent constituer des sources d'inspiration pour notre thématique.

2. Les représentations cartographiques du temps

Historiquement, trois grandes familles de pratiques se sont penchées sur les questions de représentations spatio-temporelles, en se concentrant chacune sur une dimension de l'information (Figure 3.19) :

- la chronographie, centrée sur le temps,
- la cartographie, centrée sur l'espace et
- les statistiques, centrées sur la dimension thématique.

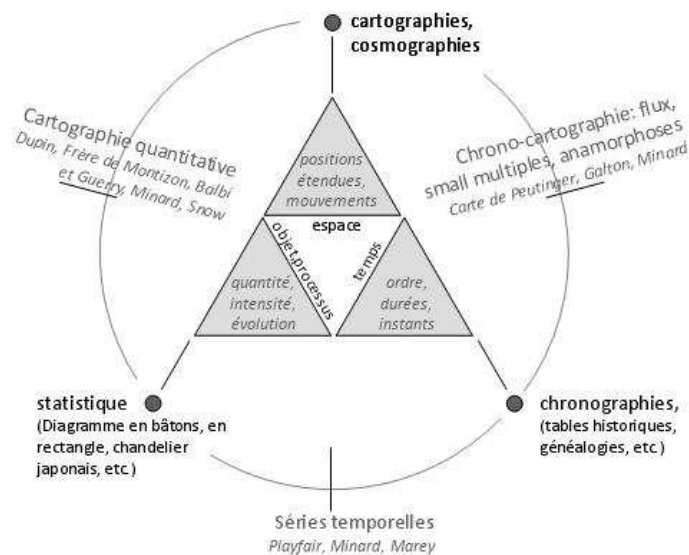


Figure 3.19. Groupes de représentations visuelles spatio-temporelles (Kaddouri et al., 2014)

Certaines représentations graphiques et cartographiques historiques ont traité la combinaison de l'espace et du temps avec ingéniosité. Ces legs peuvent servir de sources d'inspiration dans les développements modernes. Certains sont parfois « redécouverts » par la science et augmentés grâce aux technologies modernes, à la manière du cube spatio-temporel d'Hägerstrand (Kraak, 2003). Dans cette section, nous parcourons d'abord quelques legs historiques spatio-temporels parmi les plus remarquables, avant de nous intéresser à la cartographie dynamique et enfin à l'apport d'autres disciplines de visualisation d'informations.

2.1. Legs méthodologiques historiques

La représentation du temps sous une forme visuelle, qui le rende aisément perceptible, est un besoin ancien. De nombreuses représentations ont été développées au fil de l'Histoire,

souvent très ingénieuses et efficaces.

Une première représentation centrée sur l'espace parmi les plus connues est le graphique de la *campagne de Russie de Napoléon Bonaparte* par Charles J. Minard, datant de 1869 (Figure 3.20). La force de ce graphique est de rendre immédiatement visible l'existence de deux régimes de mobilité : le trajet aller vers Moscou (en beige) et le trajet de la retraite (en noir), de pair avec la décroissance fulgurante de la taille de l'armée entre ces deux régimes au moyen de l'épaisseur de la ligne d'itinéraire. De plus, l'image délivre des informations contextuelles qui permettent d'expliquer l'évolution des effectifs : les cours d'eau, obstacles naturels à traverser sur le parcours, sont affichés dans la carte et directement corrélés aux pertes humaines, et les températures fortement négatives subies par les troupes sur le trajet du retour, qui sont affichées en parallèle du graphique principal, dans la partie basse de l'image.

La carte de Minard permet donc de visualiser trois variables au long de la trajectoire de l'armée. Elle est souvent citée comme un exemple à suivre de sélection d'informations, de concision et d'efficacité visuelle.

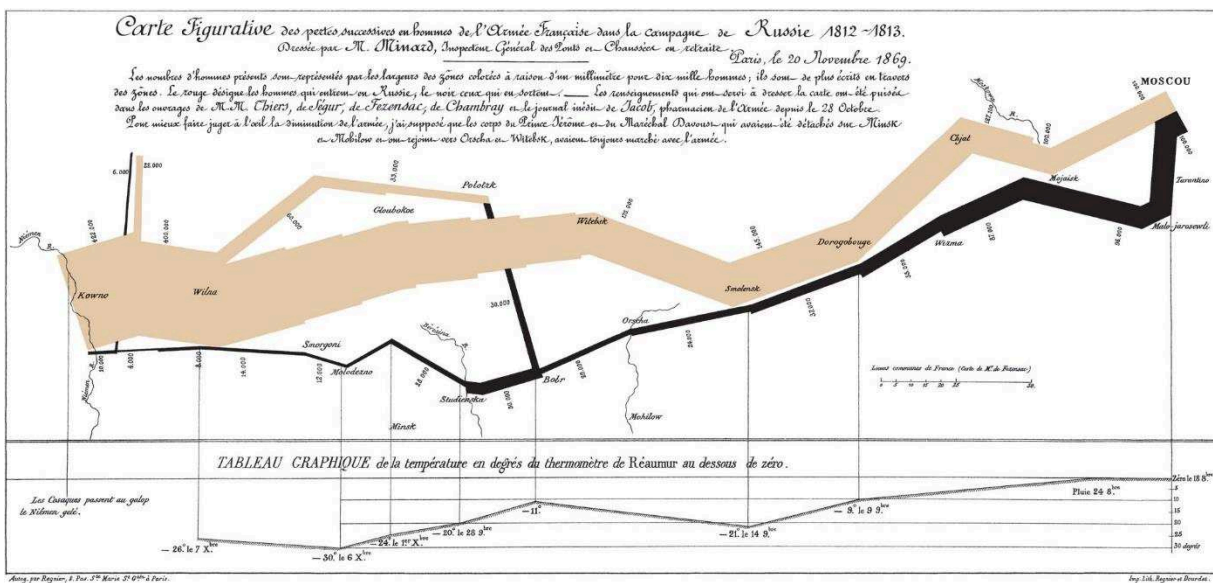


Figure 3.20. Graphique du mouvement des troupes au cours de la campagne de Russie de 1812-1813 de Napoléon Bonaparte (Minard, 1869).

Une deuxième technique historique de représentation de statistiques variant dans le temps est l'intégration de graphiques dans l'emprise de la carte. La Figure 3.21 est un exemple intéressant qui associe carte statique et graphiques temporels. Cette carte représente les variations de population entre 1801 et 1881 sous la forme de diagrammes circulaires placés sur les départements. Les variations négatives sont représentées en rouge et les positives en bleu. L'usage de couleurs différenciées permet une lecture des tendances à un niveau global, tandis que les graphiques sont déchiffrables au niveau local, ce qui permet les comparaisons d'évolutions temporelles dans l'espace.

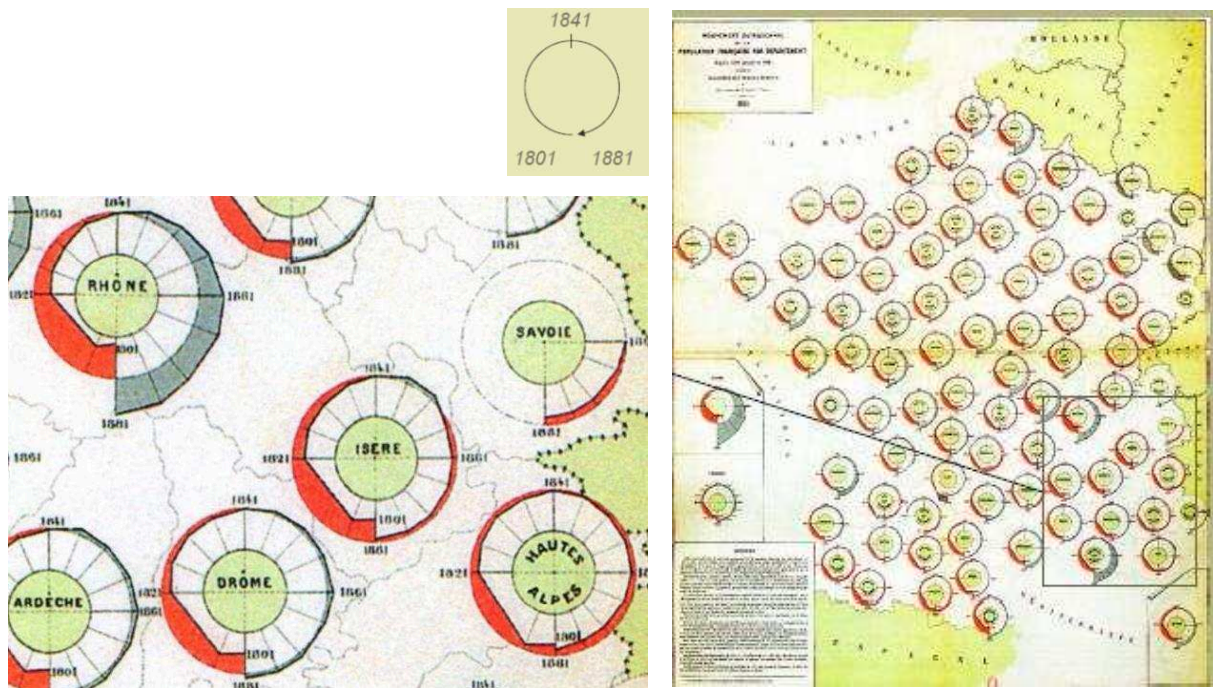


Figure 3.21. Variations de population entre 1801 et 1881, à une granularité de 5 ans (Album de statistique graphique de 1884, publié par Palsky, 1996)

Dans son livre qui parcourt un nombre important de visualisations historiques orientées temps, Tufte (1990) cite trois types de représentations spatio-temporelles : les *small multiples* (collection d'images à des dates successives) (Figure 3.22), les emplois du temps (ex : horaires de train) qui peuvent être également représentés sous forme de graphiques (Figure 3.24) et les grilles spatio-temporelles (Figure 3.35).

Les *small multiples* consistent en une répétition de cartes (ou de graphiques) figurant un même espace géographique, qui montrent chacune des instants successifs ou des paramètres différents (Figure 3.22). Placées côte à côte, elles renforcent les comparaisons des changements, des différences entre objets ou des alternatives présentées (Tufte, 1990). Dans le cas où les *small multiples* montrent un mouvement au cours du temps, Tufte suggère de les superposer et les fusionner le long d'une ligne de temps et de relier les points de localisation entre eux (Figure 3.23).

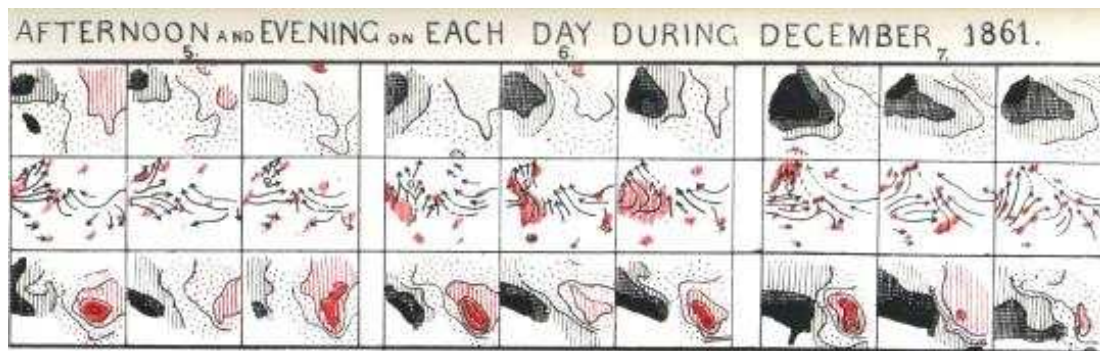


Figure 3.22. Observation de variables météorologiques par jour en décembre 1861 (Galton, 1863). Pour chaque groupe : Horizontalement, observations le matin, le midi et le soir respectivement ; verticalement, observation des pressions, vent et pluies, et températures.

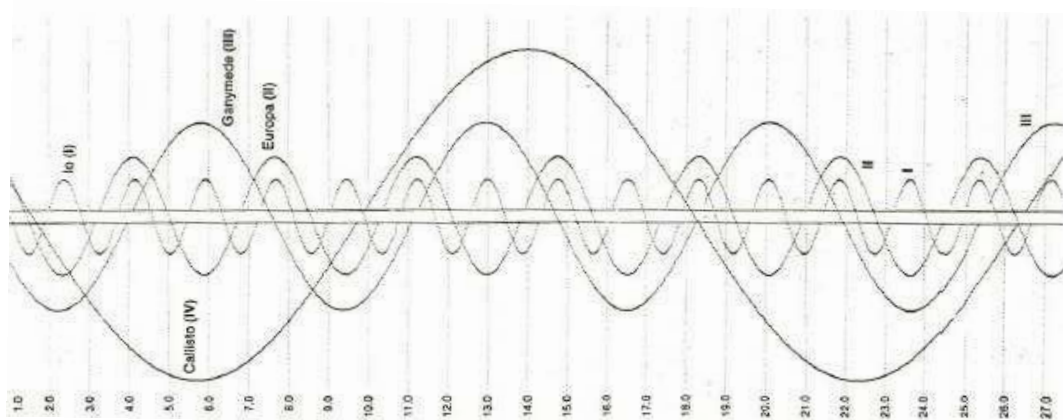


Figure 3.23. Rotation des satellites de Jupiter au cours du temps (Tufté, 1990)

En termes d'emploi du temps, l'horaire de train d'E.J. Marey (Figure 3.24, à droite) présente en abscisse le temps et en ordonnées les différentes gares du trajet Paris-Lyon Perrache en 1885. Les lignes obliques représentent les circulations de train, qui intersectent les axes horizontaux des gares à des horaires donnés. En gare, les lignes se brisent, signe que les circulations font une halte avant de repartir quelques minutes plus tard.

L'inclinaison plus ou moins forte des lignes d'horaires met indirectement en évidence une troisième variable : la vitesse des circulations. C'est ce que Tufté (1990) appelle la règle du « 1+1 = 3 ou plus » : croiser deux paramètres peut faire ressortir d'autres aspects des données de façon indirecte. Sur l'horaire de train de Marey, plus l'inclinaison des lignes de circulation est proche de la verticale, plus la vitesse des trains est élevée. Selon Tufté, l'intérêt de visualiser les emplois du temps sous forme de graphique est d'accélérer la prise de décision en cas d'imprévu impactant les circulations, en traçant la nouvelle droite correspondant au changement d'horaire d'un train, tout en s'assurant qu'il ne gêne pas les autres.

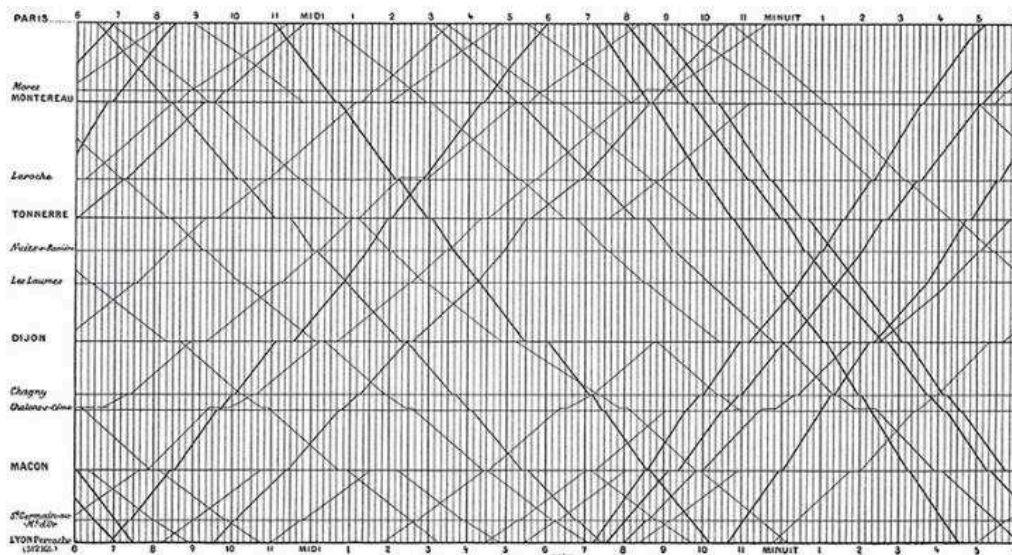


Figure 3.24. Horaires des trains sur la ligne Paris-Lyon (Marey, 1885)

Les legs historiques en visualisation spatio-temporelle, qu'ils soient orientés espace ou orientés temps, mettent donc en évidence des représentations ingénieuses, sources d'inspiration pour nos développements. Nous pouvons notamment citer l'association de graphiques simples à côté ou dans l'emprise même de la carte, qui permet de montrer l'évolution temporelle de plusieurs indicateurs, l'association de vues successives ou parallèles, ordonnées dans le temps, et la mise en relation de deux indicateurs, susceptibles d'en faire émerger un troisième.

D'abord élaborées de façon empirique, les représentations cartographiques du temps ont elles-aussi été formalisées sous la forme de bonnes pratiques. Des règles ont été proposées pour les cartes statiques, puis étendues pour s'appliquer au cas différent des cartes dynamiques.

2.2. Règles cartographiques pour représenter le temps

2.2.1. Cartographie statique du temps

Cartographie des changements

Directement héritées des legs historiques, les premières méthodes formalisées pour cartographier le temps sont la *carte statique* (c'est-à-dire la carte invariante imprimée sur papier) et la *collection de carte*.

Dans sa sémiologie graphique, Bertin définit le temps comme une variable qualitative ordonnée, mais signale qu'il peut également être considérée comme quantitatif (Bertin, 1967, p. 342). Dans un contexte statique, il propose d'appliquer aux entités distribuées dans le temps des variations de taille, de valeur de la couleur ou de grain (Figure 3.25). Des étiquettes en implantation ponctuelle peuvent par ailleurs être ajoutées au voisinage des entités pour indiquer leur date (Vasiliev, 1997).

Les cartes statiques sont cependant limitées dans le nombre de données et de pas de temps qu'elles peuvent représenter. Ainsi, en considérant un temps discrétisé en dates, la variation de valeur de la couleur ne sera pas suffisante dans le cas où le nombre de dates à représenter est élevé (i.e. dépasse 7 +/- 2 valeurs) (cf. section IV.2.3.1). Dans le cas d'un nombre de dates élevé, Davoine et al. (2012) proposent comme solution de segmenter la série de dates en plusieurs périodes, cohérentes au regard des phénomènes représentés, et d'attribuer à chacune une teinte, qui se déclinera en dégradé de valeurs de la couleur pour distinguer les dates internes à chaque période (Figure 3.26).

Les collections de carte présentent l'intérêt de décomposer les phénomènes en séries d'images simples. Mais Bertin (1967) souligne que le nombre d'images doit rester limité pour permettre de reconstituer mentalement l'animation de la dynamique représentée. Ce nombre limité est également soutenu par Tufte (1990), qui ajoute que les cartes doivent toutes être situées à portée de regard (« l'œil est actif, sélectionne et fait le contraste, ce qui est plus efficace que de se reposer sur la mémoire d'images révolues, dispersées sur de nombreuses pages ») et doivent respecter la même représentation graphique et le même fond de carte pour être efficaces.

Pour plus d'efficacité, les cartes de la collection peuvent être indexées par catégories ou par un label et être ordonnées en fonction du temps ou bien en fonction d'une variable quantitative qui n'est pas utilisée dans l'image elle-même (Tufte, 1990). Si les collections de cartes permettent de représenter les successions de changements ou de mouvements, elles ne semblent en revanche pas être adaptées à l'identification de motifs (Davoine, 2014).

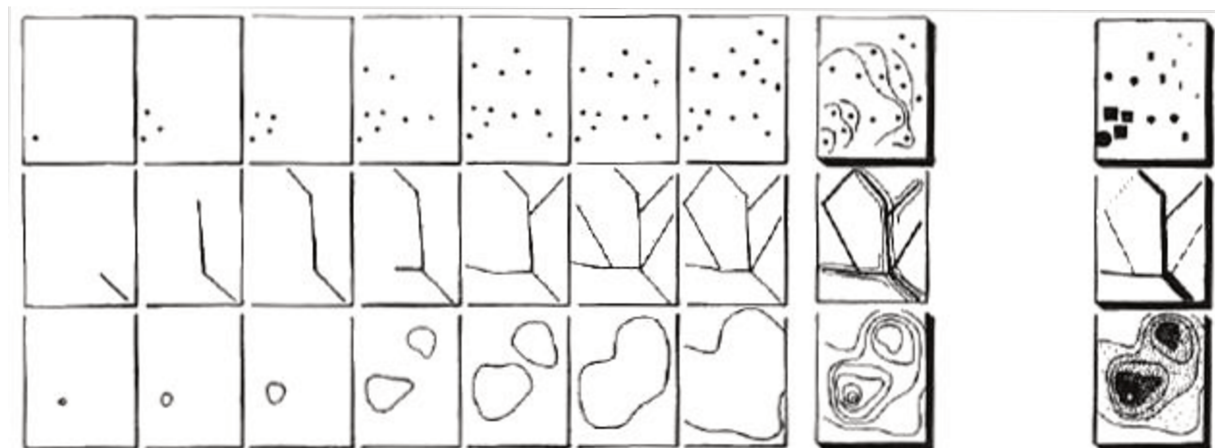


Figure 3.25. Collections de cartes (à gauche) mises en regard de cartes statiques (à droite), ces dernières utilisant la variable taille, la valeur ou le grain pour représenter le temps (Bertin, 1967)

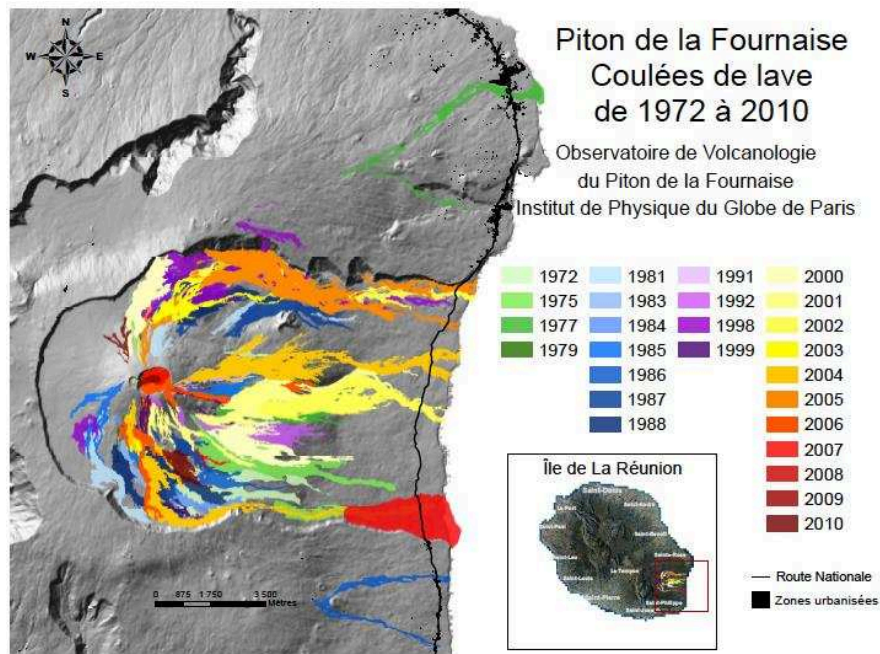


Figure 3.26. Utilisation conjointe des variables couleur et valeur pour représenter un nombre important de dates (Davoine et al., 2012)

Une autre façon classique de cartographier les dynamiques temporelles est de cartographier le *taux de variations* des attributs quantitatifs d'une même entité géographique entre deux dates (comme par exemple les variations d'indices ou de taux) (Cauvin et al., 2008b, p. 157-158). Les variations positives de quantités sont souvent représentées par des couleurs chaudes et les variations négatives par des couleurs froides (Figure 3.27).

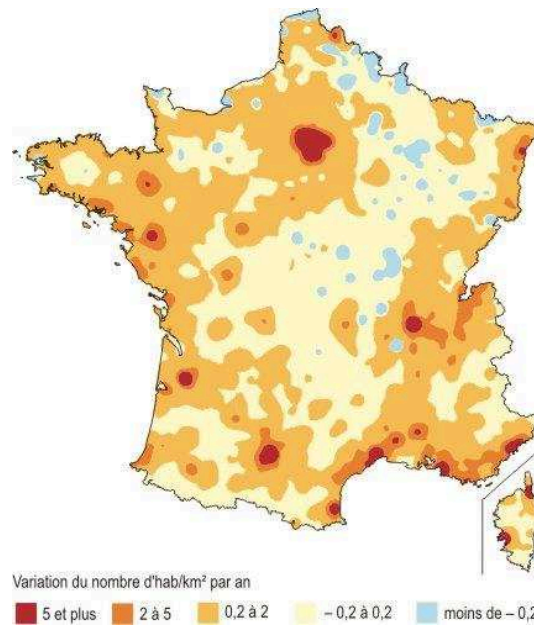


Figure 3.27. Carte de variation de la densité de population (Source : Cartesfrance.fr³⁷)

Cartographie des mouvements

Parmi les premières règles formalisées pour représenter des objets en mouvement, Bertin (1967, p.342) propose d'utiliser soit une flèche qui représente la trace et le sens d'un mobile, soit d'appliquer une des trois variables visuelles ordinales aux différents états spatio-temporels du mobile (Figure 3.28).

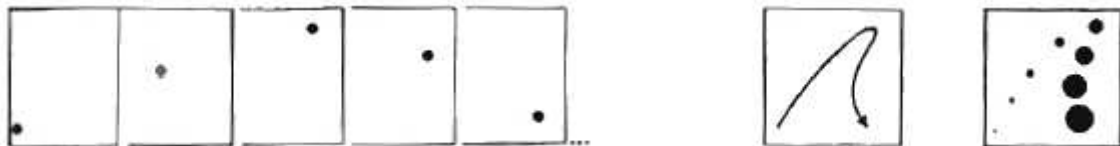


Figure 3.28. Représentations de trajectoires d'objets mobiles (Bertin, 1967)

Selon Klein (2007, p. 127), les flèches ou traces d'objets mobiles permettent de suggérer des mouvements continus, mais leur lecture peut devenir difficile lorsque les objets mobiles sont nombreux et les mouvements complexes.

En considérant que l'espace occupe les deux dimensions du plan, on peut avoir recours à la troisième dimension pour figurer le temps : cette approche élaborée par Hägerstrand (1970) est appelée le *cube spatio-temporel*. Dans cette visualisation en 3D, la trace du déplacement des objets s'élève en « altitude » dans le cube, proportionnellement au temps écoulé depuis l'origine de la trace (Figure 3.29). L'empreinte des trajectoires et des événements spatio-temporels est projetée en parallèle sur la carte 2D qui constitue le fond du cube. Cette

³⁷ Lien : <http://www.cartesfrance.fr/geographie/cartes-population/variation-densite-population.html>, consulté le 08/02/2017

méthode est le plus souvent utilisée dans le domaine de la time-geography pour visualiser des mobilités d'individus, afin d'en dégager des comportements de groupes (Klein, 2007, p. 132).

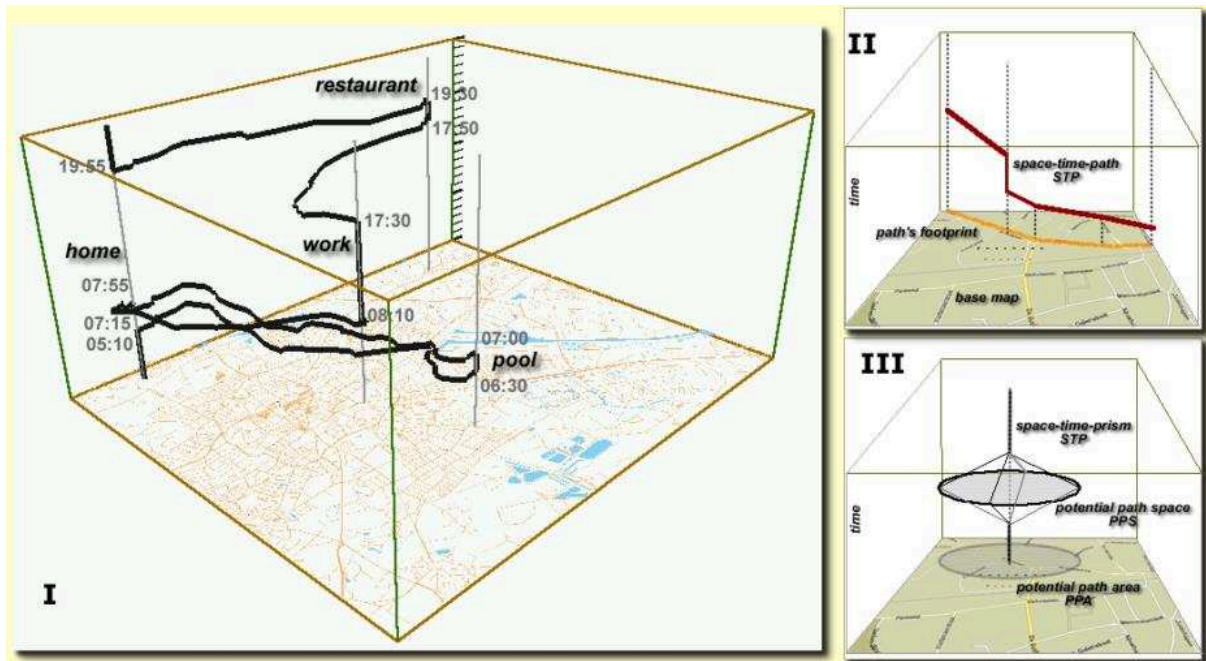


Figure 3.29. Le cube spatio-temporel (Kraak, 2003)

Enfin, lorsque le temps est considéré comme une distance de parcours, il impose une nouvelle structure à l'espace cartographique. La carte peut alors être déformée par une *anamorphose* pour représenter la « distance temporelle » entre les lieux, c'est-à-dire le temps de parcours pour accéder d'un lieu A au lieu B (Figure 3.30). Des isochrones peuvent également être utilisés pour indiquer des plages de durées de parcours (Figure 3.31).

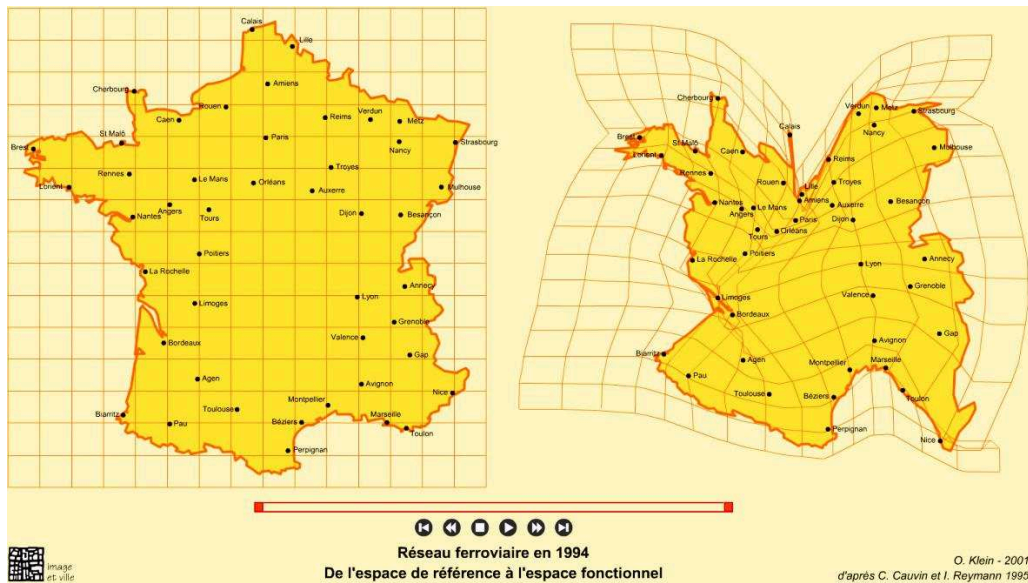


Figure 3.30. Anamorphose de la carte de France pour représenter la distance temporelle entre lieux grâce au réseau ferré en 1994 (Cauvin et al., 2008b)



Figure 3.31. Carte isochrone montrant les zones accessibles dans certaines plages de durées à partir du point central (Source : Isokron³⁸)

Le développement de l'informatique a permis l'usage d'une nouvelle dimension pour représenter le temps : l'animation, rendant ainsi les cartes dynamiques. L'animation et l'interactivité modifient la perception et les usages associés aux cartes, ce qui nécessite de développer de nouveaux paradigmes de visualisation.

³⁸ Cavailhez A. et Javault M. Site consulté le 11/10/2013, plus accessible en ligne le 01/09/2016. Ancienne URL : <http://old.isokron.com/>

2.2.2. Cartes animées

Principes de l'animation

L'animation en cartographie consiste à afficher de façon successive et rapide une série de cartes représentant un phénomène à différents instants, donnant ainsi l'illusion d'un mouvement, d'un déplacement ou d'un changement (Cauvin et al., 2008a). Kraak (2003) souligne que « les animations sont très utiles pour clarifier des tendances et des processus, aussi bien pour expliquer que pour donner un aperçu des relations spatiales ».

L'animation n'est pas utilisée que pour représenter des séries temporelles. Elle peut également être employée pour montrer de nouveaux aspects des données : on parlera alors d'*animations atemporelles* (Klein, 2007, p. 158). Les animations atemporelles peuvent être utilisées pour :

- effectuer un déplacement en survol au-dessus la carte ou une rotation, ce qui est particulièrement intéressant pour les cartes 3D (L'Hostis, 2003),
- expliciter les cartes en anamorphoses en animant le passage progressif de l'espace cartésien à l'espace contracté (L'Hostis, 2003),
- pour rendre saillants des localisations ou certaines classes d'attributs par clignotement ou en animant les couleurs de la légende (Dibiase et al., 1992; Egbert et Slocum, 1992),
- pour déconstruire et reconstruire la carte en ajoutant les couches d'informations une par une (Dransch, 1993; citée par Kraak et Klomp, 1995).

Dans la suite du texte, nous nous centrons sur l'animation temporelle.

La carte animée peut s'apparenter à un film. Elle suit donc des règles de « montage » légèrement différentes de la carte statique (Bertin, 1983; Dibiase et al., 1992).

L'animation cartographique est subdivisée en *scènes* successives, représentant chacune un instant ou un intervalle de temps.

De nouvelles variables visuelles, dites dynamiques, ont été développées, pour s'appliquer à la représentation de données dans les cartes animées (Dibiase et al., 1992; MacEachren, 1995; Dukaczewski, 2005) :

- le *moment* d'apparition,
- la *durée* de la scène,
- le *taux de changement* : il s'agit du rapport entre la magnitude d'un changement ou d'un mouvement et la durée d'affichage de la scène ; le taux de changement paraîtra élevé si la magnitude est grande et la durée des scènes courte, il paraîtra faible si la magnitude est faible et la durée des scènes longue,
- la *fréquence* des scènes, i.e. le nombre d'images par secondes,
- l'*ordre* des scènes, qui peuvent être classées par ordre temporel ou selon les valeurs

d'un attribut,

- la *synchronisation* entre événements, i.e. les événements d'animation qui surviennent au même instant et
- le *mode de transition* entre les scènes (*way of change* en anglais), par exemple le fondu enchaîné, l'étalement (ou balayage) et le zoom (Brites, 2009).

Ces variables dynamiques, initialement attribuées aux scènes de l'animation, peuvent également être utilisées pour animer les variables visuelles statiques (ex : taux de changement de la taille d'un symbole, synchronisation entre changement de couleurs,...) (Dukaczewski, 2005). Pour ce cas particulier, Dukaczewski (2005) emploie alors le terme de variable visuelle « dynamisée ». Selon lui, le nombre de variables dynamisées utilisées simultanément ne doit pas être supérieur à 3, dans une carte qui présente des données quantitatives ou ordinales.

Les variables dynamiques peuvent aussi s'appliquer à la phase de transition entre deux scènes (ex : vitesse de succession des scènes, durée d'affichage et de transition plus longue pour diminuer le taux de changement perçu) (Dibiase et al., 1992; Fabrikant, 2005; Köbben et Yaman, 1995).

Certaines des variables dynamiques proposées pour les cartes animées correspondent par nature à des temporalités (cf. section V.1.3). Dans ce cas, il semble qu'elles s'appliquent naturellement à la visualisation animée des dynamiques, sans que le cartographe ait besoin de les provoquer. Cela paraît être le cas du moment, de la durée et de la fréquence pour l'apparition d'événements, du taux de changement pour le changement d'état et de l'ordre quelle que soit la dynamique. Lorsque ces variables dynamiques sont naturellement présentes, il semble délicat de les utiliser une seconde fois pour mettre en valeur une caractéristique attributive. Elles peuvent cependant s'appliquer à l'intérieur des scènes, par exemple pour animer les attributs.

Les types de cartes animées

L'introduction de l'interactivité peut augmenter le potentiel des animations. Entre la carte statique, figée, et la carte au degré d'interactivité maximale, laissant toute liberté à l'utilisateur dans la construction de son expérience de navigation temporelle (Klein, 2007), une diversité de cartes se déclinent (Figure 3.32). Elles vont ainsi de la carte animée simple, proposant des contrôles temporels sur la lecture de la séquence, à des cartes interactives à scénarii préconstruits, sur lesquelles les possibilités d'interaction permettent au lecteur de faire des choix dans sa navigation mais sont limitées et pré-définies par l'auteur (Klein, 2007).

Au niveau technologique, l'animation image par image, basée sur l'exemple du cinéma, partage aujourd'hui la scène avec l'animation objet par objet, permise par des technologies

comme Adobe Flash® ou le format ouvert SVG/SMIL³⁹. Avec ces méthodes par objet, le principe de l'animation vue comme une succession d'images discrétisant le temps évolue vers un temps continu dans lequel chaque entité peut être le support d'un changement ou d'un mouvement, chacun caractérisé par un certain moment d'occurrence, une certaine durée, un caractère unique ou cyclique, etc.

Interactivité ↑ +	Descriptif	Caractéristiques
	Cartographie interactive	Séquence construite en temps réel
Séquence à scénarii pré-construits		<i>Possibilités limitées déterminées a priori par le concepteur de la carte</i>
Cartographie animée	Séquence animée interactive simple	<i>Contrôles de lecture (lecture, arrêt, aller au début, aller à la fin, etc.)</i>
	Séquence animée	<i>Aucun contrôle de l'animation (lancement et arrêt de l'application)</i>
0	Cartographie statique	Image figée

O. Klein - 2007

Figure 3.32. Classement du degré d'interactivité dans les cartes animées (Source : Klein, 2007)

Intérêts et limites des animations

La carte animée représente le temps réel par le temps de l'animation. Selon le principe de congruence, l'animation correspondrait à la manière dont les individus se représentent mentalement le déroulement du temps. Ce mode de représentation du temps serait alors plus naturel ou intuitif que les autres formes cartographiques pour représenter les dynamiques (Tversky et al., 2002). L'animation est un média attractif et motivant à utiliser (Rieber, 1991a). Par rapport à une carte statique elle peut réduire la charge graphique de la carte, en affichant les objets les uns après les autres plutôt que tous à la fois (Davoine, 2014). Elle permet également de percevoir plus facilement des structures, des irrégularités temporelles ou des interactions qui seraient passées inaperçues sous une forme statique (Shiple et al., 2013).

Mais l'animation présente aussi des limites. Un inconvénient trivial des cartes animées est qu'elles ne peuvent pas réellement être imprimées, alors que l'impression ou l'export au format image restent encore, de nos jours, des formats de diffusion et de travail très

³⁹ Scalable Vector Graphics / Synchronized Multimedia Integration Language. Recommandations du W3C, dernière version publiée en 2011. Accessibles sur <https://www.w3.org/TR/SVG/> et <https://www.w3.org/TR/SMIL/> (consulté le 02/09/2016)

courants (Davoine et al., 2012).

Ensuite, l'animation ajoute une dimension, donc une complexité de lecture supplémentaire à la carte. Elle soulève des problèmes cognitifs (Harrower, 2007a) :

- celui de la surcharge de la mémoire de travail, qui empêche de mémoriser et d'identifier des relations entre étapes de l'animation, au cours de son défilement, en particulier dans le cas où l'animation n'est pas interactive (Fabrikant, 2005) ; cela est dû à des problèmes d'inhibition rétroactive (définie dans la section IV.2.3.3),
- celui de l'attention partagée entre plusieurs objets en mouvement, l'attention ne pouvant a priori pas se focaliser sur plus de quatre à cinq objets simultanément dans une animation (Rensink, 2002).

Des problèmes liés aux facultés de perception visuelle humaine existent également. Un premier fait connu est la cécité au changement entre deux scènes successives (Rensink et al., 1997). Il s'agit de la difficulté à percevoir ce qui a changé dans une image entre deux étapes d'une animation. La cécité au changement peut notamment être induite par un blanc ou une discontinuité entre les deux images successives, par des motifs colorés à fort contraste qui distraient l'attention lors du changement ou par la concentration de l'attention sur l'avant-plan aux dépens de l'arrière-plan (Wikipedia, 2016a).

Une vitesse d'affichage des scènes trop élevée peut également entrer en concurrence avec le temps nécessaire à la lecture et à la compréhension graphique et sémantique (Davoine, 2014; Tversky et al., 2002).

Enfin, les animations demandent souvent plus de temps pour être explorées et ont donc un coût, ce qui peut diminuer la motivation des lecteurs (Tversky et al., 2002, p. 255). En effet, lorsqu'ils cherchent de l'information, les individus agissent en adaptant leurs activités de façon à accroître la quantité d'informations gagnées par unité de coût (coût en temps, en effort ou autre) (Pirulli et Card, 1995). Dans un monde où l'information est abondante mais le temps est limité, le coût va plutôt correspondre au temps de l'utilisateur (Card et al., 1994). Réfléchir à la rapidité avec laquelle l'utilisateur pourra accéder aux informations à travers la structure de l'outil de visualisation permet d'anticiper ce besoin d'efficacité.

Les cartes animées introduisent de nouveaux potentiels dans la visualisation de données spatio-temporelles, notamment en termes d'intuitivité et de révélation de structures temporelles. Néanmoins, leur perception est confrontée à des limites cognitives, d'inhibition rétroactive ou de concurrence entre stimuli. Elles ne constituent donc pas une solution universelle pour la visualisation de données temporelles.

Les problèmes relatifs à la perception et la mémorisation des animations expliquent que les cartographes continuent à travailler sur les cartes non animées pour représenter les dynamiques.

Récemment, les disciplines de la visualisation de données ont également développé des

méthodes de représentation, orientées temps, qui peuvent s'intégrer au sein d'un environnement de géovisualisation et venir enrichir la carte (cf. section II.1.2.1). Ces méthodes sont décrites dans la section suivante.

2.3. Visualisation d'informations orientées temps

Comme nous l'avons vu dans la partie sur les legs méthodologiques, l'idée d'intégrer des graphiques temporels à la carte est ancienne. Par exemple, selon Tufte (1990), une collection de carte est plus puissante si on associe deux points de vue différents sur les données sur chaque période (ex : une carte accompagnée d'un graphique), sous réserve que cette association soit « harmonieuse, compréhensible et intéressante ». Les graphiques apportent des informations complémentaires à la carte seule, en donnant une vue de la répartition temporelle des attributs cartographiés, que ce soit sous forme linéaire, cyclique, dynamique,... Les disciplines de la visualisation d'informations proposent de nombreuses formes graphiques qui peuvent inspirer la géovisualisation.

2.3.1. La représentation graphique du temps

La carte peut être accompagnée de représentations purement temporelles, sous la forme de graphiques. La ligne de temps (ou « timeline » en anglais) est souvent employée pour figurer un temps linéaire (Figure 3.33). La ligne de temps permet de dater les événements individuellement, aussi bien que les uns par rapport aux autres. Le temps y est figuré sur l'axe des abscisses, tandis qu'un attribut peut être ajouté sur l'axe des ordonnées. Les timelines ont donné naissance à tout un panel de graphiques temporels linéaires, tels que le *flowchart* ou le graphique en coordonnées parallèles.

D'autres graphiques temporels permettent quant à eux de valoriser la dimension cyclique du temps. C'est le cas de la roue de temps, qui se décline sous de multiples formats en InfoVis : *ring map*, diagramme en fleur, etc. (Figure 3.34). La combinaison d'une approche du temps linéaire et cyclique aboutit à des graphiques de temps hélicoïdaux ou en vague (Gautier et al., 2016) (Figure 3.33, gauche).

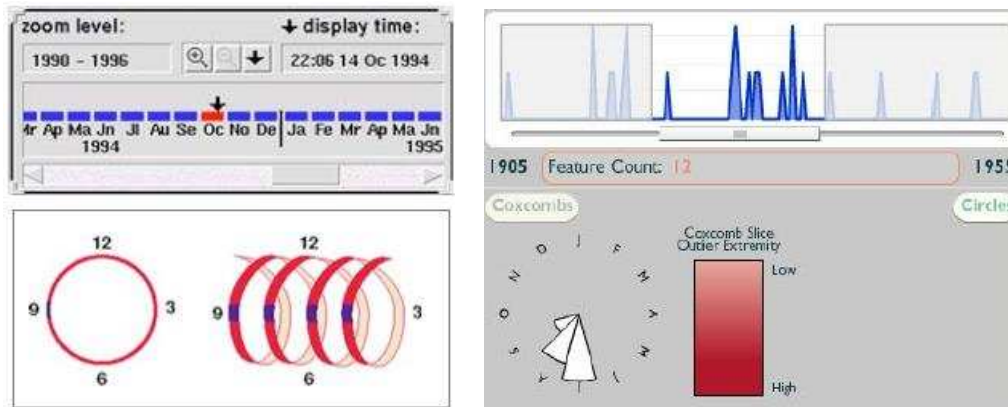


Figure 3.33. (à gauche) Ligne de temps sur une année, temps cyclique et temps hélicoïdal (Edsall et Peuquet, 1997) – (à droite) De haut en bas : ligne de temps montrant des quantités de plantes collectées par an et diagramme en fleur montrant les quantités par mois de l'année, dans l'application HerbariaViz (Auer et al., 2010)

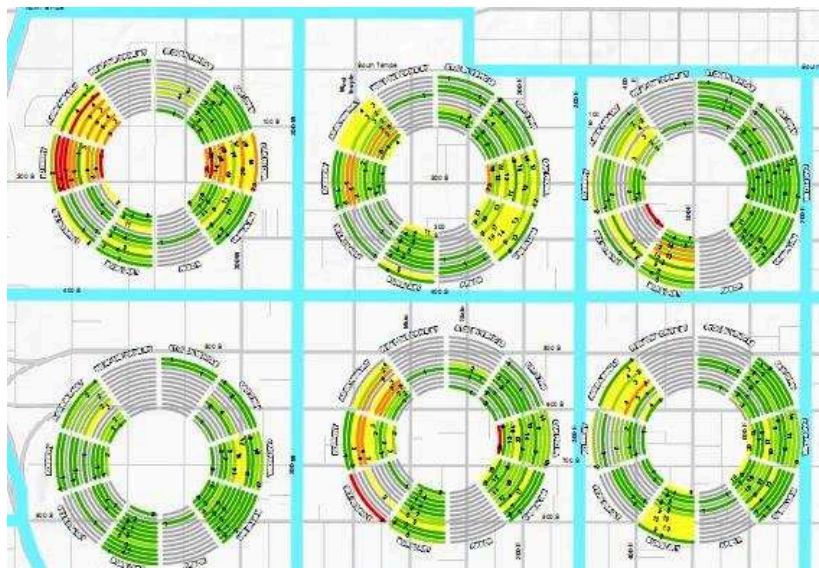


Figure 3.34. Un exemple de Ring maps (ou Data rose), montrant le nombre de crimes sur un an par quartier de Salt Lake City. Chaque graphique circulaire est positionné sur un quartier, chaque part du cercle représente un type de crime, chaque anneau concentrique représente un mois de l'année (Source : Bell, 2010)

Les graphiques linéaires et cycliques présentent chacun leurs propres avantages. D'après Tominski et Schumann (2008), les graphiques linéaires sont efficaces pour montrer les tendances générales et repérer les individus aberrants, tandis que les représentations cycliques mettent en exergue les aspects cycliques des données. Slocum et al. (2004) ont montré que lorsqu'on parle de représentation du temps, les gens ne pensent pas naturellement aux lignes de temps mais plutôt aux horloges ou aux calendriers. Ils suggèrent donc que la ligne de temps, bien qu'étant la plus fréquemment utilisée, n'est peut-être pas le moyen optimal pour donner à voir le temps et contrôler une animation.

Un autre type de visualisation du temps est la matrice temporelle, qui permet de mettre l'accent à la fois sur l'aspect linéaire et cyclique du temps. Elle peut notamment être utilisée pour représenter des événements. Dans ce type de graphique, le temps est fragmenté selon

deux niveaux de granularité, l'un représenté sur l'axe des abscisses (ex : les heures de la journée), l'autre sur l'axe des ordonnées (ex : les jours de l'année). L'intersection des deux axes forme une grille, dans laquelle chaque case peut donner à voir la variation d'un attribut (Figure 3.35). L'axe des ordonnées peut également être utilisé pour décrire une variable, au lieu du temps.

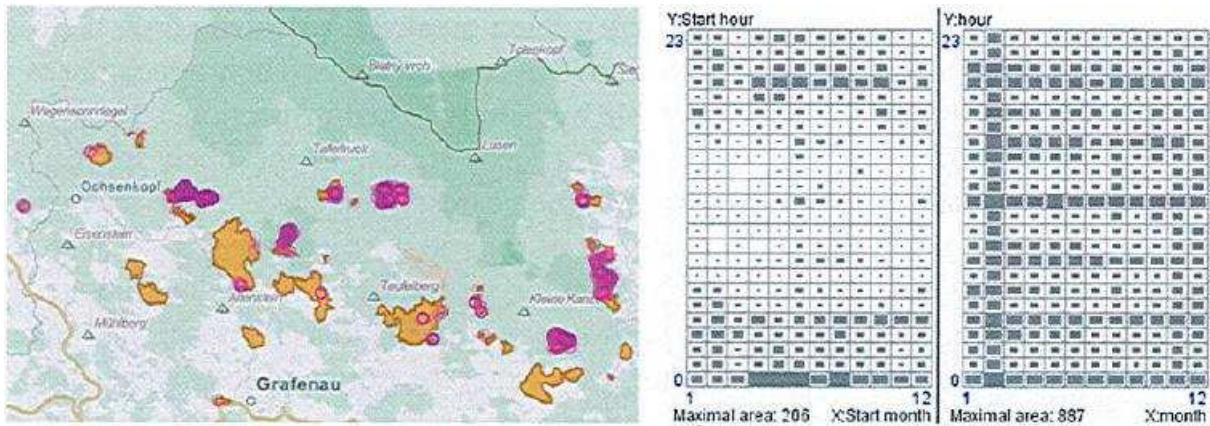


Figure 3.35. Carte et grille spatio-temporelle des déplacements d'un chevreuil selon le mois et l'heure de la journée. Chaque cercle rose, sur la carte, montre le point de départ d'un déplacement. Dans chaque grille on lit : 1) horizontalement, les 12 mois de l'année ; 2) verticalement, les heures de la journée ; 3) dans chaque case, la quantité de déplacements (Andrienko et al., 2013)

Certaines visualisations en InfoVis adoptent l'approche inverse de la cartographie : elles représentent en premier lieu la dimension temporelle et associent ensuite l'espace par un graphique ou une variable visuelle (Figure 3.36). La vue cartographique devient alors un complément, voire une abstraction. Par ailleurs, il a été démontré qu'en visualisation, l'abstraction des informations conceptuelles essentielles peut s'avérer plus efficace que les représentations plus réalistes (Tversky et al., 2002, p. 248; Wilkening et Fabrikant, 2011).

Les techniques de visualisation centrées sur la dimension temporelle permettent de présenter de temporalités plus complexes et des informations supplémentaires, en s'abstrayant de la contrainte géométrique imposée par l'espace géographique.

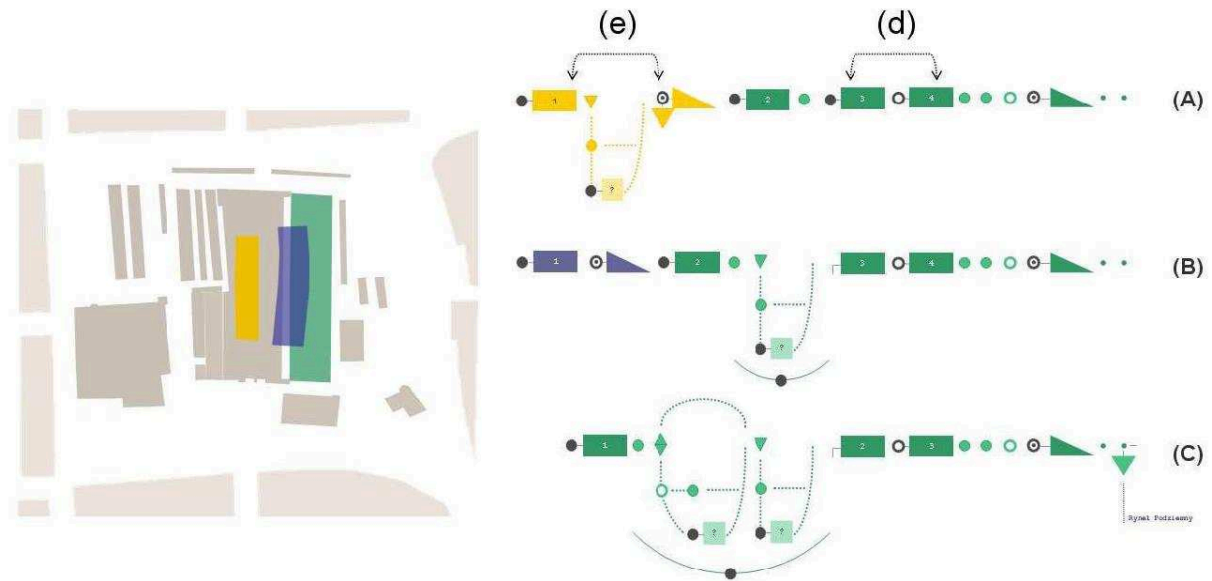


Figure 3.36. Graphiques d'interactions temporelles entre plusieurs bâtiments historiques successifs situés sur la place centrale de Cracovie (Pologne). Trois scénarios alternatifs de successions des bâtiments sont proposés sur les lignes de temps A, B et C, les symboles de formes différentes représentant différents types d'événements (construction, destruction, modification). La plupart des épisodes se succèdent en temps ordonné, comme indiqué par la lettre (d). Certains épisodes sont sujets à discussion parmi les historiens et sont représentés en temps ramifié, comme indiqué par la lettre (e) (Blaise et Dudek, 2013)

2.3.2. Liens interactifs entre carte et graphiques

En plus d'indiquer le temps ou de donner une vue temporelle des données, les graphiques temporels peuvent être utilisés pour contrôler l'affichage de la séquence temporelle dans la carte, grâce à l'interactivité (Peterson, 1999). Ainsi, cliquer sur une date du graphique temporel peut filtrer les événements relatifs à cette date. Le graphique peut alors servir de « légende temporelle » qui permet de contrôler dynamiquement l'animation (Kraak et al., 1997).

Ce contrôle interactif de l'affichage dans la carte est basé sur la technique du *linking and brushing* (cf. section II.1.2.3). Grâce à cette technique, qui synchronise graphiques temporels et carte, le clic sur une entité spatiale entrainera la mise en surbrillance des informations qui lui sont relatives dans les graphiques associés, ce qui permet à l'utilisateur de visualiser et d'analyser plusieurs dimensions de l'information en parallèle (Kaddouri et al. 2014, p.35).

Les fonctionnalités de filtre, fréquemment utilisées dans les géovisualisations temporelles, permettent de sélectionner un intervalle de temps pour n'afficher que les données relatives à cette période dans la carte (Edsall et Peuquet, 1997).

Chaque graphique temporel ayant ses avantages, la combinaison de plusieurs graphiques temporels à la carte offre la possibilité de visualiser et d'analyser diverses temporalités, selon plusieurs granularités temporelles (Figure 3.37).

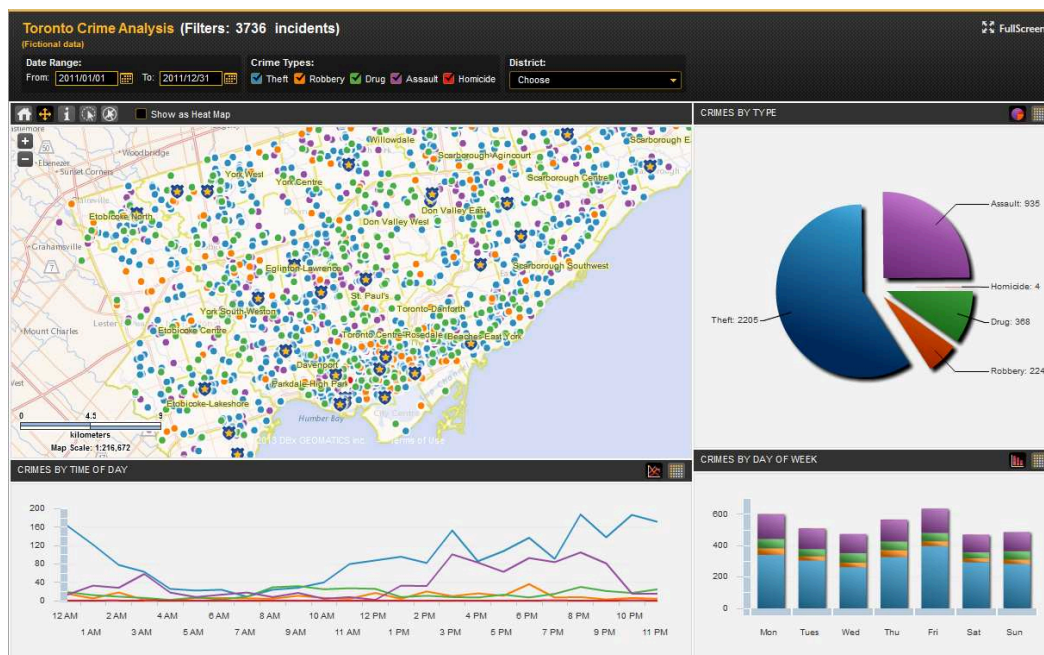


Figure 3.37. Géovisualisation du nombre de crimes dans la ville de Toronto en 2011, sur une échelle de temps cyclique et selon deux granularités : par heure de la journée (graphique en bas à gauche) et par jour de la semaine (en bas à droite) (Source : CrimeViz⁴⁰ de CartoVista©)

2.4. Synthèse

En cartographie, de nombreuses géovisualisations traitent le temps seulement comme une variable numérique ordinaire et n'exploitent qu'une faible partie des dimensions du paramètre temps. Certaines conceptions du temps sont encore peu intégrées en géomatique telles que le temps embranché et en perspectives parallèles (Andrienko et al., 2010) ou la visualisation de granularités spatiales et temporelles multiples (Kaddouri et al., 2014). Les méthodes de visualisation orientées temps peuvent donc inspirer et venir compléter la carte en apportant de nouveaux points de vue sur les données, leurs temporalités et les dynamiques.

Les technologies actuelles apportent de nouveaux potentiels de traitement de masse de données, de visualisation en temps réel, d'adaptabilité des interfaces. Les legs méthodologiques restent cependant d'actualité et gagnent à être réinterprétés dans un contexte dynamique (Davoine et al., 2015; Kraak, 2013).

De nombreuses techniques d'interaction permettent de visualiser et d'explorer les relations entre composantes temporelles et spatiales des données. Cependant, il est difficile d'intégrer tous les aspects du temps dans une seule visualisation. C'est pourquoi la majorité des

⁴⁰ Lien : <https://cartovista.com/demos/CustomFlash/CrimeAnalysisDemo/CrimeAnalysisDemo.html>, consulté le 13/01/2017

méthodes graphiques appliquées en InfoVis et Visual Analytics ne s'adressent qu'à des cas particulier (Andrienko et al., 2010). La combinaison de plusieurs graphiques temporels à la carte pourrait donc enrichir la géovisualisation. La carte peut elle-même intégrer d'avantage de temporalités, notamment à travers l'usage de variables dynamiques, ce qui peut contribuer à améliorer l'efficacité des géovisualisations temporelles.

Certains modes de représentations sont plus utilisés que d'autres lorsqu'il s'agit de représenter certaines temporalités ou certaines dynamiques. Par exemple, l'anamorphose est souvent utilisée pour représenter des temps de trajet, le cube spatio-temporel est souvent associé à la représentation de trajectoires, etc. On peut alors supposer que certains modes de représentations cartographiques seraient plus adaptés que d'autres pour représenter différentes dynamiques ou temporalités.

Des postulats ont été émis sur les associations les plus efficaces entre variables visuelles, temporalités et modalités de carte. Des travaux se sont ensuite attachés à confronter ces propositions aux utilisateurs pour construire de nouvelles règles objectivisées de géovisualisation spatio-temporelle.

3. Efficacité des représentations cartographiques du temps

Avec la généralisation des technologies d'animation et d'interactivité et la formalisation des temporalités, les cartographes se sont attachés à développer de nouvelles règles de représentation cartographiques pour garantir la transmission d'un message lisible et efficace. Certaines de ces propositions de visualisation cartographique ont été confrontées à des panels d'utilisateurs lors d'expérimentations. Ces tests sont essentiels notamment parce que les designs élaborés conformément à la représentation mentale des cartographes peuvent ne pas correspondre aux représentations des connaissances du public utilisateur de la carte (cf. section IV.1).

Cette section présente tout d'abord les règles de cartographie émises par la littérature, pour associer des variables visuelles et des modes de représentations avec les temporalités et les dynamiques auxquelles elles s'adaptent le mieux. Seules certaines de ces propositions ont été validées expérimentalement. Les preuves expérimentales d'efficacité des représentations visuelles sont donc présentées dans un deuxième temps. Elles apportent des indices éclairants sur l'adaptation du design cartographique aux utilisateurs.

3.1. Postulats sur les associations entre temporalités, dynamiques et modes de représentation

L'animation introduit de nouvelles formes de perception de la carte et de nouvelles variables visuelles. Mais elle ne constitue pas une panacée. Les cartographes ont donc cherché à déterminer quelles modalités de carte et quelles variables visuelles seraient les plus

adaptées pour représenter les différents types de dynamiques ou les différentes temporalités.

3.1.1. Modes de représentations préconisés par dynamique

Cheyland (2007) propose d'associer les questions relatives à un type de dynamique avec un type de carte ou de graphique optimal. Ses propositions sont résumées dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4. Requêtes portant sur les processus spatio-temporels et modes de visualisation suggérés (d'après Cheyland, 2007)

Dynamique interrogée	Exemple	Mode de visualisation suggéré
Requête sur l'espace uniquement	Quel est l'état de l'espace à la date t ?	Carte statique
Requête sur le temps uniquement	A quel moment ... ? Durant quelle période ... ?	Un ou plusieurs objets temporels, communiqués via : texte, graphique temporel
Requête sur le changement d'identité ou le changement d'état	Quelles sont les parcelles possédées par A et cédées à B ?	Graphique d'états et de transitions
Requête sur le changement d'état, le changement de forme ou le mouvement	Qu'est-il advenu ici ? (orienté temps)	Un vecteur temporel d'état communiqué via : calendrier, collection de carte, carte animée
	Quels lieux ont connu la même histoire ? (orienté espace)	Une liste de lieux communiquée via : texte, carte statique

Selon Cheyland, l'animation n'est adaptée qu'à l'exploration temporelle des changements d'état, des changements de forme et du mouvement. Mais il signale qu'elle ne rend pas bien compte des changements d'état dans le temps car un état est remplacé par le suivant sans laisser de traces de ses valeurs antérieures. Une solution proposée par cet auteur, mais qu'il indique comme n'étant pas pleinement satisfaisante, est de placer un petit histogramme de l'historique des valeurs sur chaque entité.

Les représentations de changement d'identité ou de changement de forme sont peu étudiées par la littérature (Cheyland 2007).

La carte de changement d'identité devrait rendre compte des processus de division/regroupement des entités. Les vues statiques seraient plus efficaces en symbolisant de façon ordonnée la géométrie des entités (Savini et al. 1999, cité par Cheyland 2007). Si le nombre d'objet est réduit, une représentation animée en 3 dimensions, indexant le temps sur l'axe vertical, est également envisageable, même si sa limite est de ne pas bien mettre en valeur les divisions et regroupements successifs des entités géographiques (McBride et al. 2002, cité par Cheyland 2007).

Pour les changements de forme, Bertin (1967) préconise la succession d'entités ou de formes auxquelles seraient appliquées des variations de taille ou de valeur de la couleur.

La représentation du mouvement est d'avantage traitée que le changement, selon Cheylan (2007), et les questions méthodologiques afférentes sont en grande partie résolues. La méthode préconisée par Bertin (1967), consistant à représenter le mouvement d'un objet mobile par sa trace sur la carte (cf. section V.2.2.1), est intéressante mais ne s'applique qu'aux objets ponctuels et présente des limites dans le cas de mouvements complexes.

Selon Caquard (2003), la variation de transparence d'un symbole peut aussi évoquer le mouvement. L'usage de l'animation pourrait permettre de représenter le plus efficacement les aspects qualitatifs du mouvement ou les phénomènes se déroulant à une granularité temporelle très fine (pseudo-continus dans le temps) (Tversky et al., 2002, p. 257).

En ce qui concerne les flux, les règles de la sémiologie graphique (Bertin, 1967) préconisent de les représenter par des lignes, pourvues de flèches si les relations sont orientées, en utilisant la taille pour figurer les quantités. D'autres propositions utilisant l'animation atemporelle figurent la direction des flux par des figurés mouvant, circulant le long des lignes de flux, à la manière de véhicules dans un tunnel (Google, 2012).

Dans le cas des cartes animées, que la dynamique étudiée soit le mouvement ou le changement, la principale limite reste que les modifications de valeurs ne sont pas toujours perceptibles du fait de l'absence de visualisation rémanente des états antérieurs. Cheylan (2007) suggère que les événements de ruptures pourraient être mis en exergue par une sur-symbolisation éphémère (flash, clignotement, autre couleur associée) et pourrait être accompagnée par une symbolisation des états antérieurs atténuée par leur ancienneté (transparence, contours uniquement).

Enfin, en se basant sur les travaux de Kraak et Ormeling (1996), Dukaczewski (2005) propose une matrice de combinaison associant :

- type de dynamique,
- variables visuelles statiques,
- variables visuelles « dynamisées »,
- géométrie d'une entité,
- nature de la donnée (nominale, ordinale ou quantitative) et
- modes de représentation cartographique (carte choroplèthe, isolignes, carte avec diagrammes, etc.).

Il obtient ainsi 101 combinaisons possibles et associe à chacune un indice d'efficacité. Cependant, la complexité de cette matrice et le fait que les variables dynamiques utilisées ne soient pas distinguées les unes des autres rend difficile son exploitation.

3.1.2. Modes de représentation préconisés par temporalité

Selon la ou les temporalités intéressant une analyse, les travaux existants préconisent d'utiliser préférentiellement certains modes de représentations pour faciliter la lecture des changements. Ces modes de représentation dépendent du mode de cartographie adoptée (carte statique, animée, collection de carte, ...) et des variables sémiologiques choisies.

Davoine synthétise les propositions de la littérature en une classification des méthodes cartographiques adaptées à la lecture de diverses temporalités (Davoine, 2014) :

- La carte statique peut permettre de représenter la durée, la vitesse de changement et la fréquence. Le cas particulier de la carte de variation entre deux dates permet aussi d'illustrer le taux de changement.
- La collection de cartes permet de représenter la date, la durée, la vitesse et la fréquence.
- La carte animée peut rendre compte de la date, de la durée, de l'ordre chronologique et de la vitesse. Les variables visuelles dynamiques, destinées aux cartes animées, permettent également de représenter la synchronisation.

Selon Tversky et al. (2002, p.257) l'animation serait la plus efficace pour représenter la séquence exacte (l'ordre) et le rythme (fréquence, vitesse) des processus. Caquard (2003) soutient que les variables visuelles les plus adaptées à l'animation seraient la taille et la valeur de la couleur.

Pour prolonger les règles de la sémiologie graphique dans le cas de la représentation du temps, les auteurs ont tenté soit de généraliser les règles classiques proposées par Bertin (Bertin, 1967; Köbber et Yaman, 1995; Vasiliev, 1997; Dukaczewski, 2005; Davoine et al., 2012), soit de proposer de nouvelles variables visuelles dynamiques adaptées aux différentes temporalités (Dibiase et al., 1992; MacEachren et Taylor, 1994; Peterson, 1994; Ormeling, 1995; L'Hostis, 2003). La synthèse de ces travaux est présentée dans le Tableau 3.5.

Tableau 3.5. Les modes de représentations cartographiques des temporalités préconisés par la littérature

Temporalité	Mode de représentation
Moment, date	Etiquettes textuelles (Vasiliev, 1997)
	Teinte (Davoine et al., 2012)
	Valeur (i.e. intensité et saturation) (Davoine et al., 2012)
	Apparition (MacEachren, 1995)
Durée	Etiquettes textuelles (point, ligne) (Vasiliev, 1997)
	Valeur (surface) (Vasiliev, 1997)
	Durée d'affichage (Dibiase et al., 1992)
Fréquence	Taille (ligne) (Vasiliev, 1997)
	Apparition (MacEachren, 1995)
Vitesse, taux de changement	Taille, graduations (lignes), couleur, valeur (surfaces) (Bertin, 1967)
	Isochrones (points, surfaces) (Bertin, 1967; Vasiliev, 1997)
	Anamorphoses (Vasiliev, 1997)
	Mode de transition entre les scènes de l'animation (Dibiase et al., 1992)
Période de retour, espacement chronologique	Apparition (MacEachren, 1995)
Ordre temporel	Ordre d'apparition (Dibiase et al., 1992)

Synchronisation	Correspondance temporelle des moments d'apparition (MacEachren, 1995)
------------------------	--

Selon Dukaczewski (2005), les variables dynamiques les plus faciles à percevoir sont la durée d'affichage, la fréquence des scènes et le taux de changement entre scènes.

3.1.3. Modes de représentation préconisés par conception du temps

Peu de propositions existent dans la littérature pour cartographier des temps divergeant de la vision la plus classique, linéaire et absolue.

Selon Tversky et al. (2002, p. 256), les phénomènes qui se déroulent selon des pas de temps discrets devraient être représentés de façon discrète plutôt que dans des animations continues, car cela se rapproche plus de la réalité du phénomène. Les collections de cartes s'adaptent mieux à des granularités temporelles homogènes (c'est-à-dire lorsque les intervalles temporels sont égaux) d'après Bertin (1967). En revanche, elles sont contre-indiquées pour représenter des granularités hétérogènes, correspondant au « temps des événements » utilisé en Histoire.

Le manque de méthodes cartographiques s'adaptant à certaines visions alternatives du temps est flagrant : le temps en ordre relatif, sans référence temporelle universelle des objets, ne dispose pas de méthode de schématisation (Cheylan, 2007). Le temps non linéaire (cyclique ou embranché) nécessite des procédures d'affichage spécifiques dans la carte (*ibid*). Et peu d'études se sont intéressées à théoriser la cartographie du temps non-linéaire, à granularité multiple, etc. Ces champs ont été d'avantage explorés dans d'autres disciplines s'intéressant à la visualisation de données (cf. section V.2.3.1).

Ces propositions de règles appliquées aux cartes temporelles ne restent que des hypothèses de recherche tant qu'elles n'ont pas été validées expérimentalement. Les recherches récentes sur la cartographie animée se sont concentrées sur la démonstration de l'efficacité des représentations cartographiques du temps dans différents contextes d'usage et auprès de différents publics.

3.2. Confrontation des cartes temporelles aux utilisateurs

3.2.1. Résoudre les limites de lecture des animations

Représentation cartographique

Des études basées sur l'oculométrie ont montré que le design de l'animation peut altérer le comportement de vision des utilisateurs (Fabrikant et al., 2008b; Fabrikant et Goldsberry, 2005). Les animations n'échappent pas au principe de saillance visuelle qui oriente la vision : si l'information d'intérêt n'est pas la plus saillante, le message cartographique peut être perturbé (Fabrikant, 2005).

Pour aider à percevoir les changements, il est efficace :

- d'insérer des indices visuels qui orientent l'attention du lecteur sur les éléments en cours de changement, par exemple des couleurs vives ou des transitions de luminosité (flash, brillance) (Khalil et al., 2005; Shipley et al., 2013),
- de favoriser les transitions progressives entre scènes de l'animation, qui permettent aux lecteurs d'anticiper les changements (Fabrikant et al., 2008b).

Bien que n'étant pas basé sur une preuve expérimentale, Cheylan (2007) propose que la persistance visuelle et mentale est « probablement le premier vecteur de l'explicitation spatio-temporelle ». La persistance graphique, désigne le fait que les états s'empilent dans l'image au cours du temps. Si la persistance n'est que graphique, alors l'allure du processus est très vite perdue au profit de la complication du graphique lui-même. Selon Cheylan, « il semble donc nécessaire de trouver des méthodes de symbolisation qui assistent, par une persistance explicite, la reconstruction mentale du processus, qui explicitent la trace connue des événements antérieurs sans troubler trop violemment la perception de l'état courant » (*ibid*).

Pour prolonger la mémoire des utilisateurs par la persistance graphique, il est possible d'associer une symbolisation saillante aux entités de la date courante et de laisser afficher les entités des scènes précédentes en leur attribuant une symbolisation plus ténue (grisé, traits fins, teintes atténuées...) (Cheylan, 2007).

Conceptualisation de l'animation

Dans une animation, ce qui se passe entre les scènes est aussi important que les scènes elles-mêmes (Peterson, 1995). Une étude de Fabrikant et al. (2008b) a montré qu'introduire une vue évolutive, faisant la transition entre deux scènes successives, entraîne que les participants consultent l'animation à une vitesse plus élevée. Dans l'expérience de Fish et al. (2011), le taux de bonnes réponses à une série de questions était plus élevé lorsque la transition entre deux scènes était évolutive comparé au cas où elle était abrupte. La transition graduelle permet en fait au lecteur d'anticiper la suite de l'animation (Lasseter, 1987).

Pour une bonne lecture des animations, il semble nécessaire de fournir des informations ou une interpolation entre les scènes pour éviter les mécanismes de cécité au changement (Shipley et al., 2013).

Pour diminuer la charge cognitive intrinsèque et extrinsèque associée aux animations, l'animation peut être segmentée en parties, par exemple en se concentrant sur plusieurs zones de tailles réduites successivement, plutôt que de montrer l'ensemble des processus en une seule fois (Khalil et al., 2005). Par ailleurs, il est préconisé de réduire le nombre

d'étiquettes textuelles, pour réduire le partage de l'attention, et de ne les appliquer que sur les objets que le concepteur souhaite rendre les plus saillants (*ibid*).

Pour réduire le partage de l'attention, Khalil et al. (2005) préconisent également de placer les étiquettes de façon contiguë aux éléments qu'elles renforcent, à la fois proches dans le temps (pas de décalage d'apparition entre un objet et son étiquette) et dans l'espace (rapprocher l'étiquette de l'objet auquel elle se rapporte).

Par ailleurs, diminuer la vitesse de l'animation dans les périodes denses en changement est une méthode qui permet d'adapter les variations de quantité d'informations au fil de l'animation à la charge cognitive du lecteur (Goldsberry et al., 2004).

En ce qui concerne la perception de l'animation, la théorie de la Gestalt (cf. section IV.2.1.2) soutient que la perception d'un mouvement s'effectue d'avantage au niveau global que local : elle se base plus sur les relations spatio-temporelles entre entités spatiales que sur le mouvement des différents objets indépendamment. Un exemple parlant est celui de la marche du pigeon (Johansson, 1973) : lorsqu'on voit un pigeon marcher, on a l'impression que sa tête avance puis recule alternativement. En réalité, il avance la tête rapidement puis la garde immobile le temps d'avancer son corps. C'est le mouvement relatif du corps par rapport à la tête qui donne la perception que celle-ci recule : les parties du corps sont perçues en relation les unes avec les autres. La tête a un mouvement de recul par rapport à son environnement local, mais pas par rapport à l'environnement global. Cela démontre bien que les éléments d'une scène ne sont pas perçus isolément les uns des autres et donc que pour visualiser efficacement la dynamique des événements, il faut considérer la perception de leurs relations temporelles, dans l'espace (Shipley et al., 2013).

Pour bien donner à voir un phénomène dynamique, le plus important n'est pas la structure spatiale des objets mais plutôt la coordination et les similarités entre les dynamiques représentées (Shipley, 2003; Troje, 2002). La détection du changement d'une entité cible peut par ailleurs être perturbée par le changement des entités adjacentes.

Cela a été démontré par une étude dans laquelle les lecteurs d'une carte pensent à tort qu'une entité avait été modifiée car trois de ses voisines avaient changé (Harrower, 2007b). Harrower nomme cet effet le « contraste simultané ».

Niveau d'expertise

Une étude de Lowe (1999) suggère que la réussite d'utilisation d'une carte animée dépend de facteurs externes à l'animation elle-même :

- le niveau d'expertise des participants,
- la complexité du processus représenté et
- la façon dont le système est représenté.

L'animation pourrait donc être difficile à percevoir et à comprendre, mis à part pour des experts avec une expérience notable dans la lecture de telles visualisations (Lowe, 1999; Slocum et al., 2000).

Rendre certaines informations redondantes en les fournissant sous différents formats (graphiques, sons, texte) paraît utile pour expliciter cette information pour les utilisateurs novices, mais cela peut causer une augmentation de la charge cognitive, qui serait superflue pour les experts (Khalil et al., 2005).

L'expérience permet de détecter plus de caractéristiques dans la visualisation animée des mouvements. Par exemple, en observant les déplacements de joueurs sur le terrain, des footballeurs professionnels peuvent dire s'ils ont affaire à des joueurs novices (North et al., 2009). Des processus d'apprentissage sont en jeu : l'exposition répétée à des motifs spatio-temporels complexes permet au système visuel d'extraire des parties de ce motif, qui sont des indicateurs permettant d'en prédire d'autres (Shipley et al., 2013). Ainsi, l'anticipation des scènes suivantes est-elle une clé qui peut aider la lecture des dynamiques.

Notons que, lors de la lecture, il peut exister un effet négatif de l'expertise qui augmente la charge cognitive : cela est dû au fait que les experts essaient de croiser l'information communiquée avec leurs schémas internes préalablement stockés dans la mémoire à long-terme (Khalil et al., 2005).

3.2.2. Le contrôle des paramètres de l'animation

Rendre interactive la carte animée peut permettre de diminuer la charge cognitive extrinsèque et d'augmenter la charge cognitive germaine (Khalil et al., 2005).

Premièrement, en pouvant stopper, avancer l'animation et se déplacer de date en date manuellement, le lecteur peut adapter la visualisation à son propre schéma cognitif, diminuant la charge cognitive extrinsèque. Deuxièmement, l'interactivité engage le lecteur dans un processus de recherche active, qui augmente la charge cognitive germaine et donc aide à la compréhension (Khalil et al., 2005). Dans une étude utilisateurs (Köbben et Yaman, 1995), le contrôle interactif de l'animation a été réclamé par les participants pour pouvoir mieux comprendre la signification des animations.

Concernant le format sous lequel est proposé l'interactivité, dans leur expérimentation, (Boyandin et al., 2012) ont observé que les utilisateurs utilisaient en majorité le curseur sur la ligne de temps et peu l'animation automatique. Ils ont également remarqué que les utilisateurs avaient tendance à rester sur leur première stratégie de manipulation de carte (manuelle ou automatique) et qu'il serait donc utile de les informer d'essayer plusieurs techniques pour voir plus de choses.

Griffin et al. (2006) ont testé l'influence de la vitesse d'animation sur la lecture. Lorsque la vitesse d'animation était trop lente (11 secondes pour 6 scènes dans leur cas) ou très rapide (5 secondes pour 6 scènes), les résultats avec la carte animée (non interactive) étaient moins

bons que pour une vitesse intermédiaire. Les auteurs concluent que, dans le premier cas, il est plus difficile de maintenir la mémoire à court-terme des objets présents dans l'image précédente lorsque le temps entre les changements d'images est plus long et, dans le deuxième cas, la vitesse trop rapide engendre un manque de temps pour percevoir et analyser les cartes. Dans une autre étude menée auprès de 10 étudiants et enseignants experts en cartographies (Köbben et Yaman, 1995), les participants commentent que les durées d'affichage longues sont ennuyeuses et font baisser l'intérêt envers la lecture de la visualisation.

Les défilements automatiques et manuels de l'animation peuvent mettre en lumière des caractéristiques différentes des données : une animation défilant automatiquement permet de distinguer des tendances dans les motifs spatio-temporels, alors que le défilement manuel est utile pour se concentrer sur des détails dans les motifs (Slocum et al., 2004).

Il semble donc qu'il soit utile de fournir les deux modes de lecture, manuelle et automatique, aux utilisateurs. En revanche, ce n'est pas parce qu'une fonctionnalité est disponible que les utilisateurs vont y faire appel. Ainsi, dans l'expérimentation de Fabrikant et al. (2008b), les utilisateurs ont majoritairement utilisé le bouton pour passer à la scène suivante de l'animation et très peu celui pour revenir à une scène antérieure, alors même que cela aurait amélioré leurs performances de réponse aux questions.

3.2.3. *La symbologie des cartes animées*

Les résultats de recherche en psychologie cognitive semblent souligner l'intérêt de communiquer l'information sémantique associée aux symboles lors de la lecture. Ceci nous a amené à poser l'hypothèse que l'usage de symboles iconiques faciliterait la compréhension et la mémorisation de la carte (cf. section IV.2.2.1). Une expérimentation, menée auprès de novices, d'étudiants en géographie et d'experts, a cependant montré que les symboles pictographiques sont préférés aux symboles géométriques dans les cartes statiques, mais qu'ils sont peut-être trop complexes pour les cartes animées (Slocum et al., 2004).

Les variables visuelles dynamiques ont été testées par Köbben et Yaman (1995) dans le cadre des animations non temporelles, pour évaluer leur pouvoir d'association, de sélection, d'ordre ou de quantification. Leurs résultats montrent que :

- la durée d'affichage permet de bien percevoir les relations d'ordre et les quantités,
- la fréquence permet de percevoir les similarités (pouvoir d'association) et l'ordre attributaire, en plus d'avoir un faible pouvoir de différenciation,
- l'ordre d'affichage et le taux de changement permettent de bien percevoir l'ordre attributaire.

L'étude de Köbben et Yaman (1995) a par ailleurs montré que les variables dynamiques sont plus efficaces en étant renforcées par des variables statiques telles que la couleur ou la valeur, pour mieux percevoir l'ordre, les quantités, les associations et les différences.

3.3. Comparatif des différents modes de représentation du temps

Nous avons vu qu'il existe plusieurs moyens de cartographier des données temporelles : usage d'une variable visuelle, d'étiquettes textuelles, collection de cartes, cartes animées... Mais existe-t-il un mode de cartographie temporelle qui serait plus efficace⁴¹ que les autres ? Qui permettrait de percevoir plus d'informations sur les phénomènes représentés ? Ou qui serait plus intuitif donc plus facile à utiliser ?

Selon le principe de congruence (cf. section V.2.2.2), on peut poser l'hypothèse qu'une carte animée serait plus adaptée qu'une carte statique pour raisonner sur le paramètre temps. Cependant, certaines études suggèrent que les personnes se reméoreraient plutôt les processus dynamiques comme une série de moments critiques, donc plutôt comme une collection d'images (Hegarty et al., 2003; Lee et al., 2003). La question du mode de représentation le plus efficace pour visualiser des événements et des dynamiques n'est donc pas triviale et a fait l'objet de nombreuses recherches.

Une comparaison difficile

Les études utilisateurs s'attachant à comparer les modalités de cartes temporelles ont montré qu'il n'est pas évident d'identifier lesquelles des cartes animées, des cartes statiques ou des collections de cartes sont les plus efficaces.

Suivant la tâche demandée et le contexte de l'expérimentation, l'une ou l'autre de ces méthodes est la plus efficace ou mène à faire le moins d'erreurs (Archambault et al., 2010; Boyandin et al., 2012; Fabrikant et al., 2008a; Griffin et al., 2006; Koussoulakou et Kraak, 1992; Robertson et al., 2008; Slocum et al., 1990).

Les sujets interrogés expriment souvent une préférence pour les représentations animées (Slocum et al., 1990), bien que cette préférence ne correspond pas nécessairement à l'efficacité de cette représentation.

D'après Tversky et al. (2002), ces différences de résultats proviennent dans bien des cas de limites dans les protocoles expérimentaux : contenu informatif légèrement différent entre les deux modalités testées, niveaux de granularité temporelle plus fin dans l'animation, présence d'interactivité seulement dans la modalité non-animée... Par ailleurs, le taux de réussite à une tâche ne reflète pas nécessairement le niveau de compréhension des concepts représentés (Tversky et al., 2002, p. 253). Cela signifie que la conclusion sur l'efficacité d'un mode de cartographie doit tenir compte du fait que la tâche testée au cours de l'expérimentation n'est pas forcément fidèle au processus cognitif qu'elle vise à observer (ex :

⁴¹ Par « efficace », on entend ici « qui permet d'atteindre l'objectif fixé en dépensant le moins de ressources (temps, nombre d'interaction) possibles ». Il correspond au terme anglais « efficient », parfois utilisé tel quel en français.

perception ou compréhension, mémorisation à court terme ou à long-terme, ...).

Les collections de cartes et les animations, lorsqu'elles ne sont pas interactives, ne peuvent probablement pas être informativement équivalentes (i.e. toute information incluse dans une modalité peut être retrouvée dans l'autre) ni computationnellement équivalentes (i.e. toute déduction peut être réalisée avec la même facilité dans les deux modalités) (Fabrikant et al., 2008a).

Ces auteurs vont même plus loin dans leurs conclusions en disant que rendre une animation équivalente à une collection de carte, dans l'objectif de mieux contrôler les paramètres de l'expérimentation, risque de diminuer le pouvoir de la carte animée. Cela n'empêche pas a priori de comparer deux modalités de cartes, mais l'analyse des résultats doit tenir compte de ces différences de nature.

Les travaux les plus récents en cartographie suggèrent que les diverses modalités de cartes ne sont sans doute pas concurrentes et s'excluant l'une l'autre, mais plutôt complémentaires, chacune répondant mieux à un type de tâche différent. Cela est développé dans le paragraphe suivant.

Des modalités complémentaires

Sur le cas d'étude des flux migratoires dans le monde, Boyandin et al. (2012) ont cherché à savoir si une carte animée et une collection de cartes menaient à la découverte du même type d'information. En plus des deux modalités testées, les participants avaient accès à une troisième carte montrant le taux de changement entre deux dates sélectionnées, accessible pendant la consultation de la carte animée comme de la carte statique. Les résultats ont montré que la carte animée menait à plus d'observation à l'échelle d'une année et à l'emploi de mots comme « jusqu'à » ou « depuis », alors que la collection de cartes favorisait les observations du type « tout le temps » et l'emploi de mots désignant des intervalles.

Dans la même étude, la carte animée conduisait à plus de comparaisons entre zones, à une échelle régionale, « de pays à pays » ou de « région à région », tandis que la collection de carte favorisait les observations de tendances à l'échelle d'une région ou du monde entier (bien que les deux types de cartes permettent de zoomer). Le nombre d'interaction était deux fois plus élevé avec la carte animée qu'avec la collection de cartes.

Ainsi, la carte animée favoriserait les interactions, pour détecter des changements et des motifs à une échelle temporelle locale, tandis que la collection de cartes serait plus propice à l'observation et à la réflexion et requerrait moins d'interactions pour trouver des motifs sur l'ensemble de la période observée (Boyandin et al., 2012).

Lors de la manipulation de la collection de carte, les participants ont beaucoup eu recours à la carte de différence, alors qu'ils l'ont moins utilisée lors de la manipulation de la carte animée. En fait, les entretiens post-expérience ont permis de révéler que les participants trouvaient les cartes de la collection trop nombreuses et trop petites pour comparer les

dates successives deux à deux.

Les lecteurs semblent préférer utiliser une carte large, fournissant une vue spatio-temporelle globale sur le jeu de données (Boyandin et al., 2012).

Cela semble expliquer pourquoi ils ont majoritairement préféré la carte animée dans cette expérimentation.

En conclusion, les auteurs encouragent à utiliser les deux cartes en complément car elles conduisent chacune à des découvertes d'informations différentes. Le passage d'un mode de représentation à l'autre sur le même jeu de données entraîne bien un changement dans le type de déductions réalisé.

Les résultats de cette étude sont confirmés et complétés par d'autres travaux en cartographie. Les animations sont les plus efficaces pour détecter des motifs qui se déplacent au cours du temps (Griffin et al., 2006) et pour percevoir les changements brefs. Les collections de cartes sont adaptées pour visualiser des tendances sur l'ensemble de la période considérée (Robertson et al., 2008) et pour comparer des période de temps éloignées (Slocum et al., 2004). Les cartes de changement entre deux dates permettent mieux de dépeindre le changement de façon explicite (Slocum et al., 2004) et de délivrer une information parfois plus directement pertinente.

3.4. Synthèse

L'état de l'art des travaux sur la représentation cartographique du temps nous a permis d'identifier que de nombreuses hypothèses existent sur la meilleure façon de visualiser des dynamiques ou des temporalités. Cependant, assez peu ont été validées expérimentalement dans le domaine de la cartographie. Il ne semble pas exister de méthode cartographique qui serait la plus adaptée dans tous les contextes. A l'issue de leur état de l'art sur la cartographie du changement, Boyandin et al. (2012) concluent que l'efficacité d'un mode de représentation est très dépendante du type d'information qui est visualisé, de la façon dont elle est présentée à l'utilisateur et de la tâche qui doit être réalisée. Selon eux, l'efficacité d'un mode de représentation devrait être testée pour chaque contexte d'utilisation particulier.

Dans le cadre de notre étude sur les inondations historiques, la carte doit retranscrire un récit (cf. conclusion de la Partie 1). Les récits sont utilisés dans toutes les cultures pour partager des expériences. Prendre connaissance d'un récit constitue une tâche particulière, pouvant faire appel à des mécanismes cognitifs spécifiques. Dans la section suivante, nous proposons d'explorer les représentations et les processus cognitifs propres aux récits, ainsi que les modes de visualisation et les variables visuelles proposées par la littérature, dont l'efficacité devra être évaluée.

4. Le cas de la visualisation de récits d'événements

Les cartes et les récits sont liés de longue date. Par sa similarité avec la vidéo, la carte animée possède une dimension narrative. En présentant des données dans le temps, elle raconte une histoire. Historiquement, les récits les plus cartographiés sous forme statique sont les récits de voyage : les itinéraires suivis et les points remarquables sont retranscrits sur la carte. Un très bon exemple est la carte de Minard (1869) (cf. section V.2.1). Mais on trouve aussi des cartes de récits relatant les autres types de dynamiques territoriales : la variation d'indicateurs démographiques ou statistiques⁴², le changement de forme des frontières⁴³, l'expansion d'une épidémie⁴⁴ ou le déroulement d'une marée noire⁴⁵, utilisant tour à tour des cartes statiques ou interactives, des collections de cartes ou des animations.

Cartographier un récit suppose d'identifier d'abord les éléments qui composent la narration. La première section présentera quelques concepts et méthodes identifiés en *narratologie*, la science qui étudie les techniques narratives. Une carte de récit gagnerait à s'inspirer de ces concepts et méthodes pour correspondre aux formes que le lecteur a l'habitude de lire et comprendre dans les récits écrits ou parlés. La façon dont les récits sont traités et compris par le cerveau humain peut également être une source d'enseignement sur les lignes à suivre pour bâtir un récit cartographique adapté aux processus cognitifs. Enfin, quelques exemples de cartes de récit seront présentés, notamment en termes de méthodes de représentation efficaces et de bonnes pratiques.

4.1. Le récit

4.1.1. Définition et fonctions du récit

Les récits sont utilisés depuis des générations, dans toutes les cultures connues, que ce soit pour persuader ou ravir (Duarte, 2010). Ils se déclinent en de multiples natures : récit littéraire, récit de la vie quotidienne, récits vrais ou fictifs, récits individuels ou collectifs... (Molino et Lafhail-Molino, 2004).

Le récit peut être défini comme « la représentation séquentielle d'événements séquentiels, fictionnels ou autres, dans n'importe quel médium » (Kafalenos, 2006). Cette définition met en avant un aspect, sous-jacent à tout récit : l'opposition entre « événements réels » et « représentation de ces événements », qui se retrouve dans l'opposition entre « histoire » et « récit ». En effet, selon Lavandier (1994), *l'histoire* est la succession chronologique de faits

⁴² Exemple : La population en cartes interactives, <http://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/graphiques-cartes/cartes-interactives-population-mondiale/>, consulté le 02/11/2016

⁴³ Exemple : The centennia historical atlas, <http://www.clockwk.com/>, consulté le 02/11/2016

⁴⁴ Exemple : Exploring the SARS epidemic, http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/SARS/sars_epidemic.html, consulté le 02/11/2016

⁴⁵ Exemple : Tracking the Oil Spill in the Gulf, http://www.nytimes.com/interactive/2010/05/01/us/20100501-oil-spill-tracker.html?_r=0, consulté le 02/11/2016

relatifs à un sujet, tandis que le *récit* est la mise dans un ordre arbitraire et spécifique des faits d'une histoire.

Cette définition est insuffisante à définir le récit car la description d'une séquence d'action n'est pas toujours considérée comme un récit : un exemple parlant est celui de la recette de cuisine, rarement considérée comme un récit à proprement parler (Wikipedia, 2016d). Pour être récit, la séquence représentée doit donc avoir quelque chose en plus.

Selon une approche issue du cognitivisme, les faits deviendraient « racontables » lorsque survient une « complication » qui noue la séquence d'actions (Bruner, 1991).

Cette complication peut être un événement inattendu ou un obstacle qui, en rompant le déroulement habituel des événements, fait que la situation devient un objet potentiel de narration (Fayol, 2000). Le récit capture non seulement la temporalité inhérente aux actions mais la met sous tension, entre un début et une fin, ce qui transforme la succession des événements en un tout porteur de sens (Kaempfer et Micheli, 2005).

Si le récit est si présent dans nos vies, nous dit la psychologie, c'est parce qu'il concourt à la formation de l'identité personnelle et du sentiment d'appartenance à un groupe : ainsi, la discipline de la psychologie narrative soutient que « les êtres humains forgent leur expérience en construisant des histoires et en écoutant les histoires des autres » (Hevern, 2004). C'est pourquoi, selon Duarte (2010), le récit est le moyen le plus puissant de délivrer de l'information : nous éprouvons de l'empathie pour les personnages qui ont vécu des défis similaires à ceux auxquels nous devons faire face, ils deviennent des mentors et nous sommes enclins à suivre leurs pas, ce qui fait du récit « un formidable outil d'engagement à l'action » (Duarte, 2010).

Ainsi, le récit historique, en rapportant le passé, n'a pas pour unique fonction de procéder à un retour dans le temps mais sert aussi la construction personnelle du lecteur, en lui rappelant son vécu et son expérience.

4.1.2. *Récit scientifique et la représentation des catastrophes*

Dans notre cas d'étude, le récit cartographique d'une inondation ne va pas seulement servir à présenter les actions d'êtres humains luttant contre les événements climatiques, il a aussi pour but de communiquer des informations scientifiques et techniques sur les événements. Il se positionne donc comme un « récit scientifique ».

Selon Duarte (2010), une présentation d'informations efficace doit être à mi-chemin entre un rapport et un récit littéraire. Le rapport informe, l'histoire divertit. Le récit scientifique a ainsi ce double intérêt de réaliser les deux à la fois.

Les récits d'événements issus de risques existent dans toutes les périodes et tous les pays. Ils témoignent de la crainte face à un danger, plus ou moins connu, et de la nécessité d'élaborer pour y faire face (Favier et Granet-Abisset, 2005). Ces éléments sont des clés de la culture du

risque, à laquelle tout récit contribue plus ou moins efficacement. Les récits de risques ont plusieurs portées (*ibid*) :

- Ils rendent compte des événements survenus, dans l'objectif de connaître et de transmettre,
- Ils expriment la façon dont les sociétés ont vécu avec la menace et dont elles l'acceptent ou l'occultent,
- les récits transforment l'image de la catastrophe et en construisent la mémoire : les différences entre abondance ou rareté des récits sur un événement, ce qu'ils contiennent ou taisent, dépend des porteurs de discours et de leurs objectifs.

Un événement peut être catastrophique pour les populations qui en sont victimes, mais c'est dans bien des cas par le récit, le discours et la médiatisation qu'on a tenu sur lui qu'il prend ou non le statut de catastrophe (*ibid*).

Les récits historiques de risques influencent donc la perception des événements et les représentations mentales des lecteurs à qui ils sont rapportés. La mise en récit d'informations sur les inondations pourrait favoriser leur mémorisation et leur remobilisation ultérieure.

Pour faire des préconisations de représentations cartographiques adaptées aux lecteurs, il peut être intéressant de s'appuyer sur la représentation et le traitement cognitif des récits, afin de savoir comment la carte peut refléter ces représentations et s'y adapter.

4.2. Approche psycho-cognitiviste des récits

La psychologie cognitive, par le biais d'expérimentations, permet d'approcher la façon dont le langage et les récits sont perçus et mémorisés.

Selon Schank et Abelson (1977), les scénarios mentaux que chaque individu élabore pour préparer sa façon de parler ou de penser empruntent la forme d'un récit. L'ordre des événements dans le scénario mental a son importance : l'ordre dans lequel un individu accomplit des tâches pour atteindre un but suit généralement un scénario constant (Lieury, 2004). L'ordre de stockage en mémoire de l'information aide par ailleurs à retenir les scénarios (Barsalou et Sewell, 1985).

Dans une animation cartographique, on peut supposer que l'ordre de présentation des événements aura une influence sur la mémorisation du récit par les lecteurs.

Une expérimentation sur la mémorisation de récit a montré que les participants se rappelaient les thèmes centraux, mais remplaçaient les termes du récit par des termes plus courants (Bartlett, 1932). Ce résultat mettait donc en évidence que le rappel d'un récit est une reconstruction, mêlant les connaissances issues du texte aux connaissances antérieures du sujet. Dans cette perspective, les connaissances antérieures du lecteur

servent de support sur lesquels viennent se greffer les informations nouvellement lues dans le récit.

Pour la construction d'un récit cartographique, il semble donc important de rapprocher le récit de l'expérience et de la pratique des utilisateurs. Exploiter ce mécanisme d'appel ou de réactivation de l'expérience grâce à la manière de présenter les informations du récit aiderait les lecteurs à mémoriser les événements et certainement à les analyser au regard de leurs connaissances pour en tirer des conclusions.

Certaines informations des récits sont mieux mémorisées que d'autres et la nature de ces informations dépend des individus. Un récit peut être découpé en épisodes, chacun ayant un début, un développement (qui contient des actions ou des tentatives) et une fin (but ou résultat) (Lieury, 2004). Les épisodes peuvent être liés entre eux par une logique de dépendances causales ou temporelles. Lorsqu'on demande à des participants de rapporter un récit dont ils ont pris connaissance, les épisodes qui constituent des développements secondaires du récit sont souvent oubliés ou bien changés d'ordre parmi les épisodes principaux (Mandler et Johnson, 1977). Par ailleurs, les éléments les mieux mémorisés dans le récit dépendent de l'âge des lecteurs. Les enfants se rappellent bien du cadre, des débuts d'épisodes et des résultats, mais ils oublient souvent les actions et la fin, tandis que les adultes se rappellent très bien du cadre et du début, se rappellent correctement des tentatives et des résultats, et se rappellent moins bien de la fin (Mandler et Johnson, 1977).

Les relations de causalité entre événements jouent aussi un rôle dans la mémorisation. Une étude montre que les phrases d'un récit sont mieux mémorisées lorsqu'elles sont impliquées dans une relation causale avec une phrase qui les précède (Black et Bern, 1981). Les événements d'un récit qui sont impliqués dans des nombreuses relations de causalité sont jugés comme plus importants que les autres, de même pour les événements qui font partie d'une chaîne de causalité qui s'étend du début à la fin du récit (Trabasso et Sperry, 1985). L'expérimentation de Bartlett (1932) a également montré que les participants utilisaient une logique causale pour reconstituer les passages ambigus du récit.

Dans le cadre de notre récit cartographique, on peut donc supposer que les événements les mieux retenus par les lecteurs seraient :

- les événements principaux constituant le fil directeur du récit,
- ceux impliqués dans de nombreuses relations de causalité,
- les événements qui se situent plutôt en début d'épisodes du récit et
- les événements qui présentent des résultats d'actions.

Il est possible d'utiliser ces résultats de façon intentionnelle dans une carte animée, en plaçant les événements les plus importants de notre récit en début d'épisode, tout en faisant ressortir la trame principale par rapport aux événements secondaires. Dans notre récit d'événements issus de risques, les épisodes sont : 1) la phase de phénomènes naturels, 2) la phase d'incidents, 3) la phase de gestion des circulations et 4) la phase de

travaux.

Les aspects cognitifs abordés ici peuvent donc nous aider à concevoir une visualisation s'appuyant sur les mécanismes mis en œuvre lors de la lecture de textes. La recherche en sciences cognitive est toujours active pour comprendre comment les récits sont construits et compris. Ces résultats sont notamment exploités par la communauté en intelligence artificielle et en interaction homme-machine pour mettre au point des interfaces s'inspirant des situations narratives, qui seraient plus didactiques et plus proches de l'utilisateur (ex: Mateas et Sengers, 2003; Schank et Abelson, 1977).

L'application des méthodes et des normes du récit textuel à l'environnement cartographique n'est cependant pas suffisante pour garantir que la carte de récit soit lisible et adaptée aux utilisateurs. En effet, on ne lit pas exactement une image comme on lit un texte. Comme l'exprime Bertin (1967, p. 428) : « le système graphique des signes (...) a ses moyens propres et par conséquent ses lois, différentes des lois des autres systèmes, du cinéma, des mathématiques, du verbe... (...) Mais il est pratiquement inconnu ! En effet, tout individu scolarisé consacre quelques 5000 heures à apprendre l'expression verbale. Il apprend pendant quelques 500 heures à reproduire un pot, une table ou une anatomie. Il ne consacre pas une heure à apprendre l'expression graphique ».

Cette affirmation, bien qu'elle puisse être nuancée avec l'avènement de la société de l'information, notamment le fait que les individus soient de plus en plus connectés et confrontés aux images et aux graphiques, s'applique certainement toujours, au moins au système éducatif. Il y a donc des adaptations à opérer pour traduire le récit sur une carte. L'état de l'art sur la cartographie de récit peut nous donner des pistes de développement.

4.3. Cartographie de récits

La carte peut être envisagée comme une interface pour voyager entre lieux et récits, soit qu'elle permette de découvrir un lieu par le récit, soit d'entrer dans le récit par un lieu choisi (Caquard et Joliveau, 2016). Le récit cartographique vise à « emmener le lecteur-utilisateur dans des lieux identifiés, pour lui communiquer des informations pré-déterminées » (*ibid*).

Cartographier les récits peut servir de multiples buts, qui vont au-delà de la localisation de successions d'événements (Caquard et Cartwright, 2014) :

- à un niveau collectif, les cartes peuvent conserver une trace des événements ou des expériences d'individus qui ont vécu des événements de vie tragiques, les rendre plus tangibles ou plus visibles pour la société ;
- la carte peut donner à voir des représentations plus artistiques de dimensions personnelles ou émotionnelles associées aux lieux ;
- elles peuvent aussi donner un point de vue différent sur un paysage ou une ville, notamment à travers des représentations innovantes qui remettent en question les représentations mentales préexistantes des lecteurs.

D'après Caquard et Cartwright (2014), la simple localisation des événements n'est pas suffisante pour donner du sens au récit : c'est leur mise en séquence qui va révéler leur signification spatiale. Pour pouvoir être cartographiés, les récits doivent être transformés pour intégrer les dimensions temporelle et spatiale et ainsi construire des « événements spatio-temporels » qui seront reportés sur la carte (Massey, 2005, p. 130).

Ainsi, nous considérons que toute carte temporelle, dès lors qu'elle donne à voir une dynamique ou une séquence d'événements et qu'elle révèle des événements inattendus mettant la séquence d'événements sous intrigue (cf. section V.4.1.1), peut être qualifiée de *carte de récit*.

Dans cette section, nous proposons de parcourir des exemples variés d'interfaces de géovisualisation décrivant des récits d'événements. L'objectif est en particulier d'étudier la structure des interfaces, les fonctionnalités qu'elles intègrent et la combinaison éventuelle de plusieurs méthodes de visualisation, mises en œuvre pour explorer les récits cartographiques. Cet état de l'art empruntera la typologie des dynamiques spatiales décrite dans la section V.1.4, afin d'étudier un échantillon reflétant la diversité des géovisualisations temporelles existantes.

4.3.1. Fonctionnalités interactives des géovisualisations de récit

Localisation d'événements

Un premier type de carte racontant un récit est constitué par l'apparition d'événements successifs, géolocalisés au cours du temps. Ce procédé permet d'observer des motifs d'occurrence ou d'expansion.

La visualisation de la Figure 3.38 donne à voir l'expansion des journaux locaux aux Etats-Unis de 1690 à 2011⁴⁶. A travers un inventaire par accumulation de points, cette carte montre la diffusion et la croissance en nombre des journaux, de la côte Est vers l'Ouest, et met en évidence l'apparition d'éditions en différentes langues à partir des années 1850 grâce à la saillance de la couleur. A travers cet inventaire, le lecteur peut observer un autre phénomène en parallèle : celui de l'avancée de la colonisation des Etats-Unis, d'Est en Ouest.

⁴⁶ Source : www.stanford.edu/group/ruralwest/cgi-bin/drupal/visualizations/us_newspapers, consulté le 11/07/2014

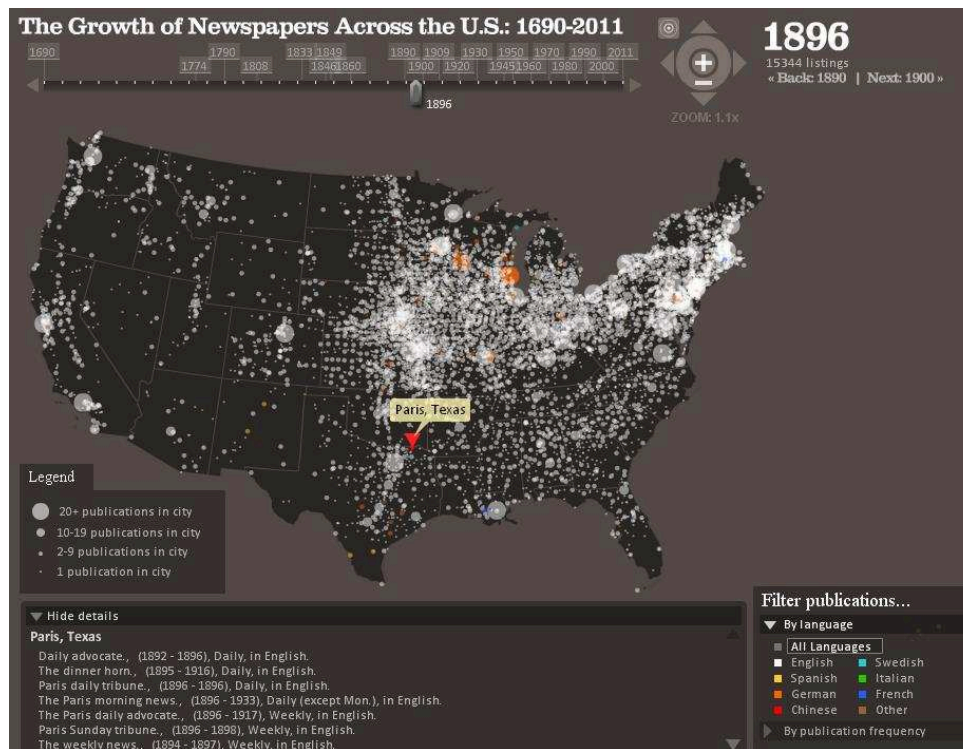


Figure 3.38. L'expansion des journaux aux États-Unis entre 1690 et 2011

Bien que très simple dans la dynamique mise en scène, cette visualisation en cercles proportionnels insiste bien sur la densité des éditions de journaux, exprimée par l'accumulation de figurés dans certaines zones. A travers l'animation à un pas de temps régulier, elle donne une vision de la vitesse du phénomène d'expansion, avec une accélération de l'apparition de nouveaux titres dans la période récente.

L'affichage de dates de références, localisées au-dessus de la ligne de temps, met en exergue les intervalles temporels où des événements majeurs se sont produits. A ces dates particulières, des résumés textuels des événements sont disponibles, qui permettent au lecteur d'avoir une explication des tendances observées sur la carte.

Changements d'état

Une deuxième dynamique qui peut être explorée à travers des récits est le changement d'états de l'espace. La carte dynamique de la Figure 3.39 montre l'évolution du taux de propriétaires de logements aux Etats-Unis entre 1900 et 1990⁴⁷. Elaborée dans le cadre d'un programme de recherche en géovisualisation, cette animation vise à détecter des tendances et des motifs, spatiaux (zones ayant des comportements similaires) ou temporels (période de décroissance globale du taux de propriété).

Ayant été évaluée auprès d'utilisateurs dans une expérimentation cartographique, la

⁴⁷ Source : Fabrikant, S. I., Montello, D. R. et Goldsberry, K. (2004). Projet Animeye. Disponible sur : <http://www.geog.ucsb.edu/~animeye/animations.htm>, consulté le 14/12/2016

représentation finalement choisie propose des transitions progressives entre les scènes de l'animation en interpolant la variable quantitative cartographiée dans les périodes ne disposant pas de mesures. Ce procédé met l'accent sur les variations de valeurs quantitatives, l'œil étant attiré par les changements d'intensité de la couleur. Cette variation progressive permet également au lecteur de capter les changements relatifs à plusieurs régions durant ces phases de transition séparant deux dates.

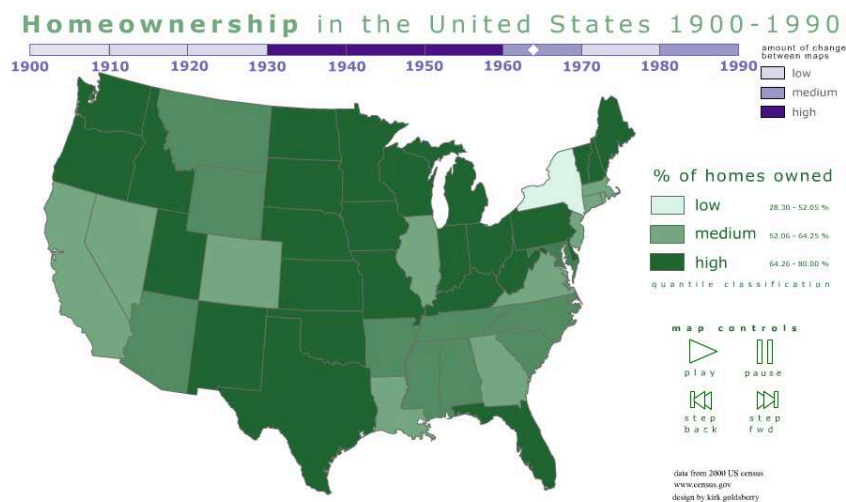


Figure 3.39. Evolution du taux de propriété aux Etats-Unis entre 1900 et 1990

Une originalité de cette application est qu'elle propose une variation de la vitesse d'animation en fonction de la quantité de changements de chaque période. Le taux de changement (une temporalité assez rare dans les environnements de géovisualisation) est directement visualisable sous la forme d'une variation d'intensité de la couleur dans la ligne de temps. Le ralentissement de la vitesse dans ces périodes denses a notamment pour fonction de laisser le temps aux lecteurs de percevoir tous les changements se produisant simultanément dans la carte, de façon à éviter une surcharge cognitive.

Une visualisation de changements d'état peut également indirectement communiquer un processus de diffusion, donc des flux, comme la géovisualisation de la propagation de l'épidémie de SARS de 2003⁴⁸ présentée en Figure 3.40. L'observation de l'évolution du nombre de cas dans chaque pays au cours du temps révèle implicitement la diffusion de l'épidémie dans les pays limitrophes et laisse deviner des voyages intercontinentaux qui la propagent également à d'autres régions du monde. Un graphique accompagnant la carte permet d'observer l'évolution du nombre de cas totaux à travers le monde, faisant écho à l'évolution mondiale observable dans la carte.

⁴⁸ Source : http://arnaudbanos.perso.neuf.fr/SARS/sars_epidemic.html, consulté le 11/07/2014

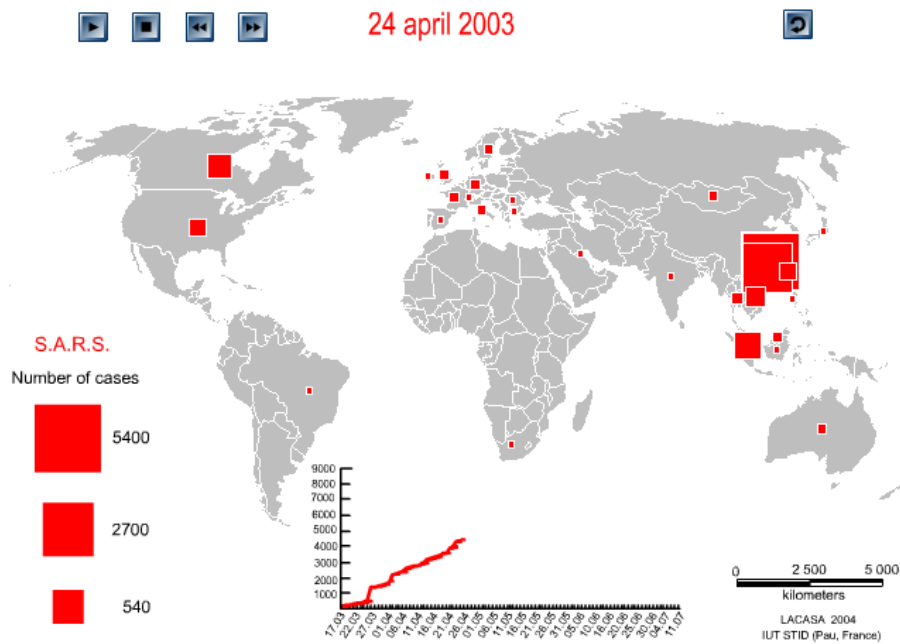


Figure 3.40. Exploration de l'épidémie de SRAS de 2003 (Banos et Lacasa, 2007)

Changement de forme

L'application Harmonie-Cités⁴⁹, présentée sur la Figure 3.41, est une géovisualisation interactive et animée, illustrant une dynamique de changement de forme. Elle donne à voir la croissance urbaine au cours du temps sur un échantillon de villes des Etats-Unis. Elle montre à la fois le passage du statut de ville standard à celui d'agglomération, puis à celui de métropole et aussi l'extension de l'aire métropolitaine au fil du temps. Au fil de l'animation, on observe une accélération exponentielle de la vitesse d'expansion des aires urbaines, à partir des années 1980. L'animation à pas de temps régulier permet donc de percevoir la date des changements, la durée entre deux états consécutifs d'une aire urbaine et le taux de changement.

⁴⁹ Source : Projet Harmonie-Cités, Disponible sur : <http://atlasvillesusa.parisgeo.cnrs.fr/>, consulté le 14/12/2016

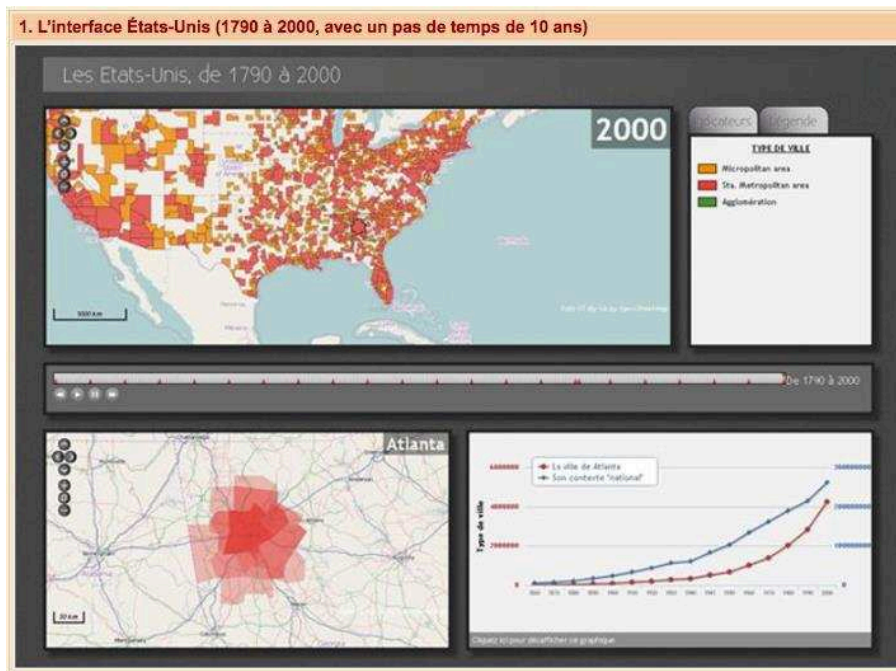


Figure 3.41. Application Harmonie-Cités montrant la croissance urbaine des villes aux Etats-Unis de 1790 à 2000 (Bretagnolle et al., 2008)

Un point intéressant de cette application est la combinaison de plusieurs vues, graphiques et cartographiques, sur les données :

- une carte à petite échelle, qui montre une vue globale de la croissance et du changement de statut des villes (de ville simple à métropole) dans le pays, mettant plutôt l'accent sur les changements d'état,
- une carte à grande échelle, qui montre le changement de forme de chaque aire urbaine au cours du temps,
- un graphique statistique, permettant de contextualiser l'information sur une ville en cours d'observation par rapport à la moyenne nationale et insistant donc sur le changement attributaire.

Ces trois vues synchronisées fournissent chacune un point de vue complémentaire sur les données et mettent en valeur une diversité de dynamiques.

Mouvements

Les géovisualisations de mouvements et de déplacements sont un champ de recherche prolifique, surtout dans le domaine de l'analyse et de l'exploration des mobilités individuelles. Pour ce qui est de communiquer des récits de déplacements, la carte statique reste encore très utilisée (ex : Abbott, 2013; Bahoken et al., 2016; Bonin et al., 2013; Buard, 2012).

Du côté des géovisualisations, un premier type d'environnement d'analyse de trajectoires, qui tend à se répandre aujourd'hui, est constitué des services de suivi personnel d'activités. Ces applications permettent à un individu d'enregistrer ses déplacements lors de la pratique

d'activités sportives, tels que ses itinéraires de randonnée, de course à pied, de vélo,... puis de les rejouer en visualisant, sous forme de graphiques temporels et de cartes, l'évolution de constantes mesurées en temps réel au long de sa trajectoire (Figure 3.42). Ce type d'application, destinée au grand public, utilise généralement des interfaces intuitives, pourvues d'un nombre réduit de fonctionnalités d'interactions. La synchronisation des sélections entre les différentes vues graphiques permet de révéler des corrélations intéressantes, quoiqu'évidentes, entre les paramètres mesurés (ex : diminution de la vitesse de déplacement quand le dénivelé augmente).



Figure 3.42. Capture d'écran d'applications combinant cartes et graphiques, qui permettent de visualiser les paramètres mesurés en temps réel le long d'un itinéraire de course, telles que l'altitude, la vitesse de déplacement,... – A gauche : l'application mobile Garmin Connect Mobile App⁵⁰ - A droite : le logiciel Quickroute⁵¹

Flux

Les cartes de flux sont en réalité des cartes de mouvements qui se concentrent sur la représentation des transitions entre lieux et sur leurs caractéristiques, plus que sur les objets mobiles eux-mêmes.

L'application « How music travels »⁵² permet d'observer l'apparition des styles musicaux dans l'espace et dans le temps de 1800 à 2000 et les influences entre styles dans le temps et dans l'espace. Un premier aspect original de cette visualisation, illustrée sur la Figure 3.43, est l'abstraction de l'espace sous une forme schématique, grâce à des cercles proportionnels sur lesquels viennent se distribuer les genres musicaux. Le second aspect original est la visualisation des relations d'influence entre les styles musicaux sous la forme de flèches

⁵⁰ Source : RunningAddict.fr, <http://www.running-addict.fr/test-running/test-garmin-forerunner-230-et-235-montre-gps/>, consulté le 16/01/2017

⁵¹ Source : vidéo de démonstration, <https://www.youtube.com/watch?v=Ib78o3h5eD8>, consulté le 16/01/2017

⁵² Source : <http://www.thomson.co.uk/blog/wp-content/uploads/infographic/interactive-music-map/index.html>, consulté le 01/12/2016

animées. L'affichage de ces relations permet en particulier de percevoir les transferts à longue distance entre continents.

L'animation permet de percevoir la vitesse d'apparition et de diffusion des styles, ainsi que les périodes d'espacement temporel (notamment entre 1850 et 1910) durant lesquelles rien ne se passe. En revanche, probablement à cause de la complexité graphique induite par l'accumulation de lignes, elle ne permet pas de repérer aisément des motifs spatiaux dans l'apparition des styles. La possibilité de pouvoir manipuler l'animation interactivement joue alors un grand rôle.

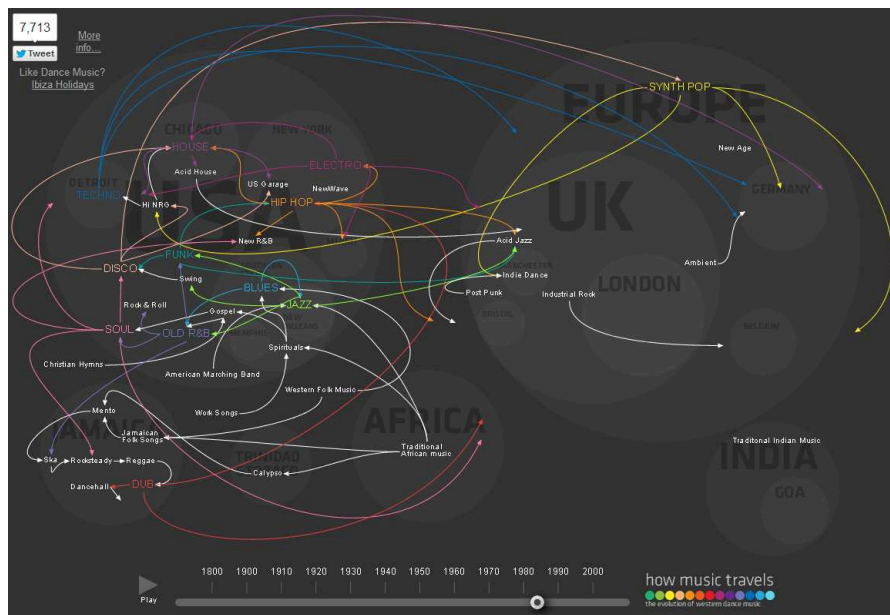


Figure 3.43. Influences spatio-temporelles entre les styles musicaux (« How music travels »)

Couvrant des dynamiques différentes, les géovisualisations explorées dans cette partie ont un certain nombre de points communs, qui peuvent ressortir comme des bonnes pratiques :

- elles sont toutes centrées sur la dimension spatiale, la carte occupant la plus grande partie de l'interface,
- elles proposent toutes un contrôle manuel de l'animation, ce qui est un point fort pour faciliter l'exploration des dynamiques et la découverte de motifs spatio-temporels,
- certaines sont dotées de vues graphiques parallèles, permettant d'observer l'évolution de variables complémentaires qui explicitent le phénomène principal représenté dans la carte,
- toutes sont animées,
- la majorité d'entre elles proposent également, à l'étape finale de l'animation, une vue globale intégrative des changements ou des mouvements qui sont survenus sur l'ensemble de la période couverte par le récit. Cette vision synthétique finale

peut permettre d'orienter l'exploration de l'utilisateur après qu'il ait pris connaissance de l'animation dans sa globalité.

Dans ces visualisations, la perception du récit est induite par la succession des épisodes au cours de l'animation. Ces visualisations restent cependant très orientées sur la vision des données d'entrées elles-mêmes, aux dépens de la dimension narrative, notamment de l'explicitation du passage entre deux états. Les relations entre événements successifs nous semblent notamment être porteuses de sens dans la lecture du déroulement des phénomènes. Pour approfondir ces aspects, il peut être intéressant d'explorer des exemples de visualisation donnant à voir explicitement les relations entre scènes, donc explicitant les « processus », au-delà du simple « inventaire spatio-temporel de données ».

4.3.2. *Cartographie des relations en chaîne entre événements*

Parmi les cartes interactives de récit disponibles sur internet, au moins deux visualisent explicitement les relations en chaîne entre événements. La première décrit le récit de l'inondation de la Nouvelle-Orléans (Etats-Unis), lors du passage de l'ouragan Katrina en 2005⁵³ (Figure 3.44). Cette animation propose au lecteur un cheminement interactif dans le récit de l'inondation. A chaque étape de l'animation cartographique, des flèches animées indiquent la direction d'expansion des eaux de l'inondation, tandis que des symboles clignotant signalent les événements de rupture de digue. Ce procédé met l'accent sur le fait que ces événements sont la conséquence des étapes précédentes de l'inondation. Un texte descriptif des phénomènes survenus accompagne chaque scène. L'animation ne se déroule pas automatiquement mais seulement sur demande de l'utilisateur, ce qui lui laisse le temps voulu pour explorer visuellement la scène et lire le texte descriptif.

⁵³ http://www.nola.com/katrina/index.ssf/2015/08/katrina_flooding_map.html, consulté le 04/11/2016

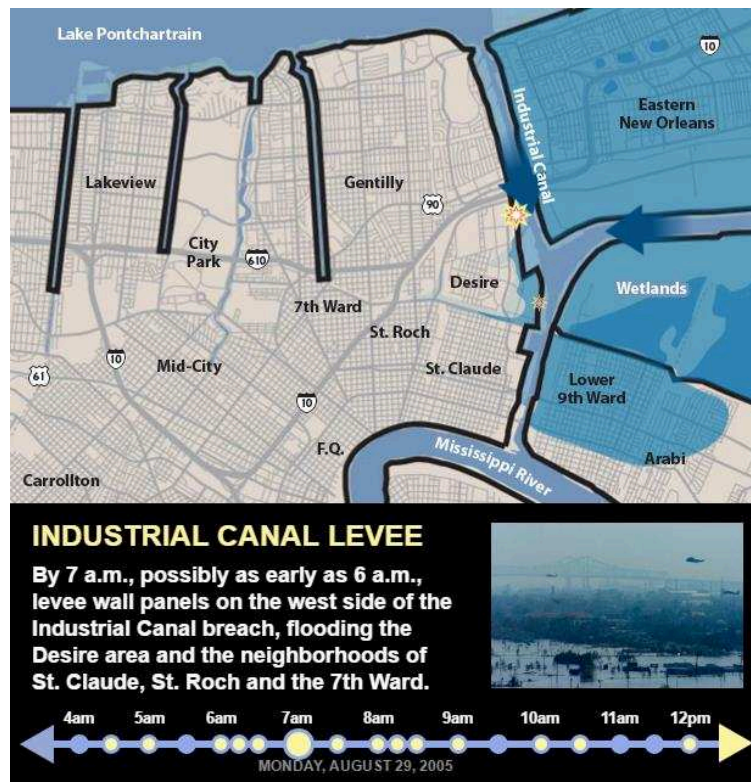


Figure 3.44. Cartographie du récit de l'inondation dans la ville de la Nouvelle Orléans causée par l'ouragan Katrina (Dan Swenson, nola.com)

La deuxième géovisualisation de relations en chaîne entre événements est l'application Atlasciné⁵⁴ (Caquard et al., 2012) conçue pour visualiser le déroulement spatial de l'intrigue de films, appliquée au répertoire cinématographique canadien (Figure 3.45). La carte animée montre les lieux successifs où se déroule le récit d'un film, ainsi que le temps passé dans chaque lieu, sous la forme de cercles proportionnels qui s'élargissent proportionnellement à la durée de la scène.

Le temps de l'animation cartographique est proportionnel au temps écoulé dans le film. Des couleurs différentes indiquent des natures d'actions différentes, qui se succèdent en dessinant des « cernes de croissances » sur les cercles proportionnels. Deux localisations successives dans le récit sont reliées par une ligne pleine, d'autant plus épaisse que les allers-retours entre ces deux lieux sont nombreux. Les lieux évoqués uniquement dans le dialogue des acteurs, sont considérés en relation avec le lieu de l'action en cours bien qu'ils ne soient pas visités, et lui sont reliés par des lignes pointillées.

⁵⁴ <https://atlascineproject.wordpress.com/>, consulté le 04/11/2016

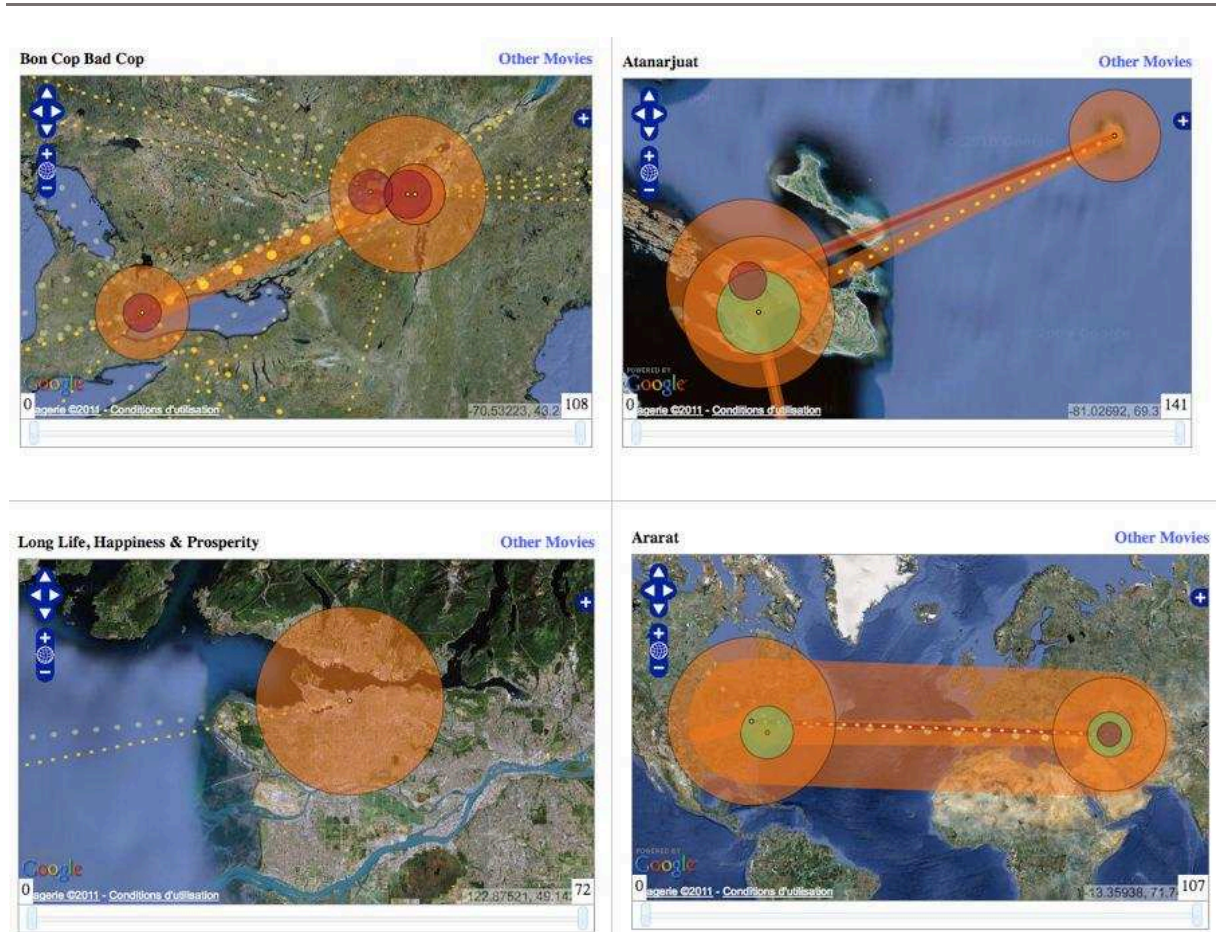


Figure 3.45. Exemples de cartes des lieux apparaissant dans des films et des relations chronologiques entre ces lieux, cartographiés avec l'application AtlasCiné (Caquard, 2011)

Ces deux géovisualisations présentent l'avantage de garder une trace des étapes antérieures de l'animation, jusqu'à fournir une vue d'ensemble du récit à l'étape finale.

Sur la carte de récit de l'ouragan Katrina, les zones inondées s'accumulent au cours du temps et ne s'effacent jamais. Dans AtlasCiné, les cercles proportionnels concentriques témoignent de la durée des localisations d'événements et restent affichés jusqu'à la fin de l'animation. La conservation graphique des scènes précédente peut alléger la mémoire de travail du lecteur, qui n'a pas besoin de se remémorer l'ensemble des étapes antérieures de l'animation (cf. section IV.2.3.3). Elle peut également permettre au lecteur de bénéficier d'une vue globale sur l'ensemble du récit pour mener une analyse globalisée, une fois la fin de l'animation atteinte.

Une caractéristique qui fait la force de la carte de l'ouragan Katrina est le découpage du récit en épisodes bien distincts, chacun pourvu d'une description textuelle et d'une explicitation cartographique animée.

La segmentation en épisodes peut aider l'utilisateur à comprendre et mémoriser le récit, d'autant plus que ces épisodes sont reliés entre eux en un tout cohérent grâce à l'affichage des relations de causalité (cf. section V.4.2).

En revanche, une limite de la carte de l'ouragan Katrina est que l'exploration spatio-temporelle du récit est très guidée par la séquence prévue par le concepteur. L'interface ne permet pas à l'utilisateur de se déplacer librement parmi les lieux, par exemple pour se centrer sur une zone qui l'intéresserait plus ; il est forcé de prendre connaissance de l'ensemble de la séquence préalablement déterminée. La visualisation ne peut donc pas s'adapter au processus de construction de connaissance (cf. définitions dans la section IV.2.2) propre à chaque utilisateur. La navigation dans le temps est également contrainte par l'ordre séquentiel des scènes, les contrôles ne permettant de se déplacer que de scène en scène, à la granularité de l'horaire de chaque épisode successif.

Dans l'application AtlasCiné, une limite importante est qu'il manque une dimension descriptive associée aux événements qui apparaissent sur la carte : si le type où l'échelle spatiale associés à chaque action sont bien indiqués par la variable visuelle « couleur », il n'est pas possible de connaître le contenu de la scène cinématographique qui se déroule à cet emplacement particulier. Cela empêche le lecteur d'intégrer la sémantique des événements dans sa représentation mentale du récit. Par ailleurs, les lignes de relations qui apparaissent successivement entre lieux s'agrègent et se superposent jusqu'à l'étape finale de l'animation. Bien qu'elles puissent être utiles à l'analyse, ces superpositions occasionnent parfois un enchevêtrement qui fait obstacle à la lisibilité.

Les enseignements issus de la littérature nous permettent finalement de proposer des modes de représentations tentant de répondre à ces limites.

4.4. Synthèse

Comme les représentations cartographiques dynamiques, le récit littéraire possède des caractéristiques temporelles et obéit à des règles de construction. Il induit des mécanismes cognitifs spécifiques, notamment en ce qui concerne la mémorisation et la représentation mentale des épisodes, ces deux processus pouvant être influencés par l'explicitation des relations de causalités entre événements et les représentations mentales préalables des lecteurs.

La carte présente des limites pour représenter les récits. D'une part, la carte, en tant que support scientifique issu d'un processus de rationalisation de l'information, a tendance à déshumaniser le récit et à gommer les émotions (Caquard et Cartwright, 2014), qui concourent pourtant à maintenir l'attention du lecteur et peuvent l'aider à mémoriser (Duarte, 2010). Pour transmettre l'aspect émotionnel du récit, il pourrait être nécessaire de combiner d'autres médias à la carte (Caquard et Cartwright, 2014). D'autre part, le récit se déroule souvent à plusieurs niveaux d'échelles imbriqués, du local (ex : maison, quartier) au global (ex : région, pays, voire voyage entre pays), et la navigation entre ces échelles cartographiques au fur et à mesure que le récit se déroule est complexe (Weber Reuschel et al., 2014).

A travers un état de l'art des applications de géovisualisation de récit, nous avons pu voir émerger certaines caractéristiques communes aux cartes de récit : la présence systématique

de l'animation, l'enrichissement par des graphiques temporels et des lignes de temps interactives et enfin l'affichage des relations de succession et de causalités sous forme de lignes orientées, dans l'emprise de la carte. Les bonnes pratiques qui se dégagent des diverses méthodes de représentation cartographique du temps et leurs échos dans les mécanismes cognitifs des individus, lorsqu'ils sont connus, peuvent être intégrées dans un outil de géovisualisation destiné à représenter le récit des inondations historiques et leurs impacts.

Conclusion de la Partie 3

La prise en compte de l'utilisateur final lors de la phase de conception de la carte amène à repenser le processus de choix du mode de représentation cartographique. Celle-ci amène le cartographe à se questionner sur les modes de représentations qui ne seraient plus seulement adaptés à sa représentation de la réalité mais aussi, et surtout, à la représentation de l'utilisateur. L'adaptation aux représentations mentales des lecteurs de la carte présuppose d'avoir une visibilité des expériences et connaissances communes du groupe d'utilisateur auquel la carte est destinée, pour pouvoir s'y rattacher dans la symbologie employée.

Notre intuition profonde est que l'adaptation aux mécanismes cognitifs de lecture et de compréhension peut renforcer l'efficacité des représentations cartographiques, comme cela a été démontré dans plusieurs études sur l'exemple de la saillance visuelle (Fabrikant et al., 2010; Lansdale et al., 2010). Parmi les principes intégrables dans nos propositions de visualisation, parcourus dans la section IV.2, nous retenons notamment :

- La distinction figure-fond, issue de la théorie de la Gestalt, qui recommande d'utiliser des symboles simples, familiers, disposés sur un fond neutre,
- Le respect du principe de saillance visuel, pour orienter la lecture vers les figures de la carte les plus intéressantes thématiquement,
- La distinctivité des symboles les uns des autres et le renforcement de leur dimension sémantique, pour faciliter la mémorisation et la compréhension,
- L'introduction de fonctions interactives, qui permettent respectivement d'augmenter la charge cognitive germaine et de diminuer les charges cognitives intrinsèque et extrinsèque.

Le cas particulier de la compréhension des récits est, pour sa part, lié à des enjeux de mémorisation. Pour faciliter la compréhension et la mémorisation du récit (cf. sections V.4.1 et V.4.2), il convient de :

- Rendre clairement distinguable le début, le milieu et la fin du récit,
- Mettre en exergue l'événement perturbateur qui vient nouer la séquence d'actions et capter l'attention du lecteur,
- Mettre en valeur les relations de causalités entre événements, qui aident à les mémoriser.

La production d'une géovisualisation de récits d'événements peut s'appuyer sur de nombreuses propositions de représentations cartographiques issues de la littérature. Des méthodes cartographiques soit statiques, s'appuyant sur des variables visuelles (cf. sections V.2.1 et V.2.2.1), soit animées et représentant le temps par l'animation et des variables dynamiques (cf. section V.2.2.2), ont été développés pour visualiser les différentes temporalités des données. La visualisation du paramètre temps peut également être enrichie

par l'association de graphiques temporels synchronisés avec la carte (cf. section V.2.3). Enfin, quelques propositions s'attachent également à la visualisation des relations de causalité, en les représentant par exemple sous la forme de flèches ou de lignes reliant les événements entre eux (cf. section V.4.3.2).

Les validations expérimentales ne font pas ressortir de représentation cartographique qui serait la plus efficace pour représenter les temporalités. A la place, elles mettent en avant la complémentarité des approches animées et non-animées, qui révèlent chacune des caractéristiques différentes des données (cf. section V.3.3).

Des manques peuvent cependant être identifiés dans la littérature, pour cartographier les récits.

Premièrement, les géovisualisations de récit s'attachent le plus souvent à des dynamiques de localisation d'événements ou de mouvements (cf. section 4.3.1), mais peu s'intéressent à la visualisation de processus plus complexes, tels que ceux intervenant dans les risques naturels.

Deuxièmement, les géovisualisations présentant des récits ont fait l'objet de très peu d'évaluations formelles auprès d'utilisateurs. Il n'est donc pas possible de savoir si les méthodes de visualisation utilisées sont réellement adaptées à l'analyse de récits, et encore moins dans notre contexte particulier d'utilisation par un public expert.

Nous proposons de contribuer sur ces deux aspects en proposant une méthode de géovisualisation systématisée du récit des inondations historiques, s'inspirant des résultats des travaux existants. Les propositions de visualisation ont ensuite été évaluées auprès des utilisateurs grâce aux méthodes issues de la psychologie expérimentale (définies dans la section IV.3). Ces résultats sont présentés dans la partie suivante (Partie 4).

Partie 4

Géovisualisation de récits d'événements : propositions méthodologiques et évaluation expérimentale

Partie 4 : Contributions en géovisualisation et sur l'évaluation expérimentale en cartographie

Notre démarche de valorisation cartographique des récits d'inondations historiques et de leurs impacts se base sur l'optimisation de l'utilité et de l'utilisabilité de la représentation cartographique élaborée. Pour être *utile*, la carte doit répondre aux objectifs des utilisateurs. Pour être *utilisabile*, elle doit fournir une information lisible et conforme à leur expérience et leurs pratiques.

Pour produire une carte utile, nous avons commencé par analyser le contexte métier et les besoins des utilisateurs. Dans le chapitre I, nous avons identifié que notre public cible principal a un profil d'experts métiers en hydrologie et hydraulique du système ferroviaire. Ces experts souhaiteraient des cartes montrant le récit des inondations et les effets dominos entre événements. La finalité d'usage de telles cartes serait de constituer un outil de retour d'expérience sur les inondations historiques. Ces résultats nous ont permis de sélectionner les données utiles à l'analyse experte, puis de co-construire avec les utilisateurs un schéma de représentation de ces connaissances. L'ontologie IDISFER ainsi constituée, présentée dans le chapitre III, décrit les processus d'inondations, les effets dominos et l'ancrage spatial et temporel des événements issus de risques.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la façon de représenter cartographiquement ces événements formalisés dans l'ontologie, en cherchant des méthodes permettant d'intégrer les dimensions temporelle et spatiale du récit dans des cartes géographiques. Le parcours des travaux issus de la communication et de la psychologie cognitive, présentés dans le chapitre IV, et les méthodes de visualisation spatio-temporelles évaluées auprès d'utilisateurs, explicitées dans le chapitre V, nous ont permis de retenir des méthodes de visualisation du temps et des récits susceptibles d'être utilisables pour notre public cible.

Si de nombreux développements cartographiques ont vu le jour pour cartographier des récits d'événements ou de trajectoires, peu de recherches se sont intéressées à la cartographie des processus complexes. Par ailleurs, la majorité des propositions de la littérature n'ont pas été évaluées auprès d'utilisateurs (cf. section V.4.3).

En nous inspirant de l'état de l'art, nous proposons de pallier ces manques dans les méthodes de géovisualisation de récits, en proposant une interface de géovisualisation qui répond aux problématiques de nos données. Le chapitre VI présente nos propositions de visualisation et leur systématisation sous la forme de règles, exprimées dans un formalisme pseudo-mathématique, afin de favoriser la réutilisation des résultats. Ces règles expriment comment projeter et mettre en forme les données structurées dans l'ontologie IDISFER, selon les caractéristiques des données et l'échelle de la carte.

Le chapitre VII présente ensuite l'évaluation de la géovisualisation produite auprès de notre public cible. Le protocole expérimental mis en place est détaillé, en soulignant quelques originalités méthodologiques qui ont été testées. Les résultats permettent d'identifier les

propositions les plus efficaces ainsi que leurs limites.

Sur la base de ces résultats, le chapitre VIII propose des améliorations possibles dans les protocoles expérimentaux en cartographie, en développant un modèle de protocole standardisé, adapté à l'évaluation d'interfaces de géovisualisation.

VI/ Propositions de visualisation pour explorer récits d'inondations et causalités entre événements

La section I.3.4 nous a permis d'identifier que les hydrologues et hydrauliciens spécialistes du système ferroviaire, qui constituent le public cible de notre carte, sont en majorité habitués à utiliser des cartes interactives et des logiciels de traitement de données spatialisées. Néanmoins, ils les utilisent majoritairement pour un usage de présentation de données, c'est-à-dire un usage plutôt novice.

Nous en déduisons que les fonctions intégrées dans notre application de géovisualisation présentant les inondations historiques doivent être assez simples pour s'adapter aux usages actuels. L'application peut ensuite prolonger ces usages, en introduisant des fonctionnalités de synthèse et d'analyse, mais les utilisateurs auront sans doute besoin d'un temps d'adaptation pour les intégrer. La représentation cartographique proposée devra également être assez simple à lire (notamment en intégrant une quantité d'informations limitée – cf. section II.2.2.5 – et un nombre assez faible de variables visuelles simultanées) et devra faire appel aux formalismes cartographiques dont les utilisateurs sont familiers dans les cartes qu'ils utilisent habituellement.

Sur la base de ces principes, censés garantir l'adaptation de l'interface de géovisualisation aux utilisateurs, la section 1 de ce chapitre décrit des règles de représentation cartographique pour traduire les événements modélisés par l'ontologie en une représentation graphique. Ces règles s'appliquent à la visualisation des concepts d'« événements » et de « relations de causalité » tels qu'intégrés dans l'ontologie IDISFER (cf. section III.3.3).

La section 2 présente comment la proposition cartographique est dynamisée et intégrée au sein d'un environnement de géovisualisation. Des propositions de visualisation sont émises pour favoriser la visualisation des multiples temporalités associées aux événements.

1. Des objets de l'ontologie à la carte : vers des règles de représentation

Cinq cas d'étude d'inondations historiques (cf. introduction de la Partie 2) ont été instanciés dans l'ontologie IDISFER (cf. section III.4.1), couvrant des régimes de crue et des causes hydro-climatiques variés :

- crues rapides / crues lentes,
- débordement de cours d'eau / ruissellement,

- orages / influence nivale / remontée de nappe phréatique.

Les objets du système ferroviaire touchés et les effets dominos observés sont également diversifiés et couvrent toutes les branches du système ferroviaire. Nous disposons donc d'un jeu de données test intéressant de par la variété des concepts adressés. La problématique est ensuite de le retranscrire dans la carte.

Dans cette section, nous exposons les choix de représentation que nous avons faits pour visualiser les événements et leurs relations de causalité. En se basant sur les principes sémiologiques provenant de la littérature, il est possible d'associer les concepts stockés dans l'ontologie à un mode de visualisation cartographique. Pour chacun des choix sémiologiques réalisés, nous proposons une formalisation sous la forme de règles de représentations, exprimées dans un formalisme pseudo-mathématique. Ces règles peuvent être vues comme un premier pas vers la définition d'une méthodologie générique de construction d'une interface de géovisualisation, destinée à visualiser des récits historiques de risques.

Pour rappel, le récit de l'inondation est constitué d'une succession d'événements, datés et géoréférencés, qui sont liés entre eux par des relations de causalités.

Les concepts structurant du récit, destinés à être représentés dans la carte, sont :

- les classes d'événements,
- les relations de causalité entre événements et
- les propriétés des classes intéressant l'analyse du récit (caractéristiques spatiales, temporelles et descriptives).

La suite du texte s'intéresse aux propositions de visualisation relatives à chacun de ces points successivement.

1.1. Visualisation des événements

1.1.1. Une vision systémique des impacts des inondations

Un principe de la cartographie est la sélection des éléments à représenter dans la carte. Les événements survenus pendant l'inondation sont nombreux et de natures diverses. La première question qui se pose est de savoir s'il est plus intéressant pour les experts de tous les visualiser ou, à l'inverse, d'en sélectionner certains et selon quels critères.

Les données à intégrer dans la carte pourraient par exemple se restreindre aux seuls événements qui ont un impact sur les composants ferroviaires intéressant notre public d'hydrologues : ouvrages en terre, ouvrages hydrauliques, voie et ouvrages d'art. Ce contenu est a priori adapté aux besoins de ce public et permettrait de diminuer la densité de symboles co-existants dans l'emprise de la carte. Il a en effet été démontré que les cartes contenant une densité de données faible sont généralement considérées comme plus lisibles

(cf. section II.2.2.5).

Néanmoins, cette sélection de données aurait aussi pour effet d'occulter une partie de la complexité du système soumis au risque, notamment l'interdépendance entre les composants ferroviaires. Les effets dominos ont pour effet qu'un impact sur l'objet d'étude des hydrologues peut causer un impact sur un objet externe à leur champ d'étude (par exemple l'obstruction d'un ouvrage hydraulique peut engendrer le débordement de l'eau et la submersion d'une sous-station électrique). La connaissance de ces impacts en chaîne peut donc enrichir l'analyse et déclencher la mutualisation des données entre différents corps de métier. L'occultation d'une partie de la complexité du système est un facteur de risque, comme l'exprime Le Moigne (1999, p. 5) : « la simplification du compliqué, appliquée au [système] complexe, a pour conséquence une aggravation de la complexité par mutilation, et non pas la résolution du problème considéré ».

Ainsi, pour pouvoir observer les réactions en chaîne entre événements issus d'inondations, tous les événements stockés dans l'ontologie doivent être projetés dans la carte. Ceci n'est envisageable que parce que notre public cible est constitué d'experts, qui peuvent a priori manipuler des cartes contenant une quantité d'informations plus grande que les autres publics (cf. section II.2.2.5). Par ailleurs, des fonctions interactives intégrées dans l'interface de géovisualisation permettront aux utilisateurs de sélectionner ou filtrer certains événements sur demande, au fil de leurs analyses et en fonction de leurs objectifs, comme le préconise le mantra de recherche visuelle (cf. section II.1.2.3). Les fonctions interactives intégrées dans l'interface seront développées dans la section VI.2.

En formalisant ce principe sous la forme d'une règle, il est possible d'écrire :

Soit $IDISFER$ l'ensemble des instances de concepts de l'ontologie IDISFER.

$\forall e \in IDISFER, \exists \mathcal{P}(e)$, où e désigne une instance d'une classe du type « événement » dans l'ontologie IDISFER et la fonction $\mathcal{P} : e \mapsto \mathcal{P}(e)$ désigne la projection de l'instance e sur la carte.

$\mathcal{P}(e) = (x, y)$, c'est-à-dire que la fonction \mathcal{P} associe des coordonnées géographiques (x, y) à e dans l'espace graphique de la carte. x et y sont exprimés en pixels.

1.1.2. Homogénéisation des granularités spatiales et temporelles

Les événements stockés dans l'ontologie ont des granularités spatiales et temporelles multiples et hétérogènes (Figure 4.1) : implantations spatiales ponctuelles (ex : rupture de rail au point kilométrique 508.555), linéaires (ex : débordement du cours d'eau du Tech) ou surfaciques (ex : record de précipitations sur le département des Pyrénées-Orientales) et localisations temporelles en tant qu'instantané (ex : le 17 octobre 1940) ou intervalles (ex : du

12 janvier au 6 juillet 1940).

Or, tous ces objets géographiques ont la même nature sémantique : ce sont des *événements*. Leur co-visualisation dans la carte présente deux verrous principaux : d'une part il est difficile d'appliquer une symbologie homogène à des objets de géométrie variable, et d'autre part la symbologie doit représenter de façon lisible que ces objets sont de même nature.

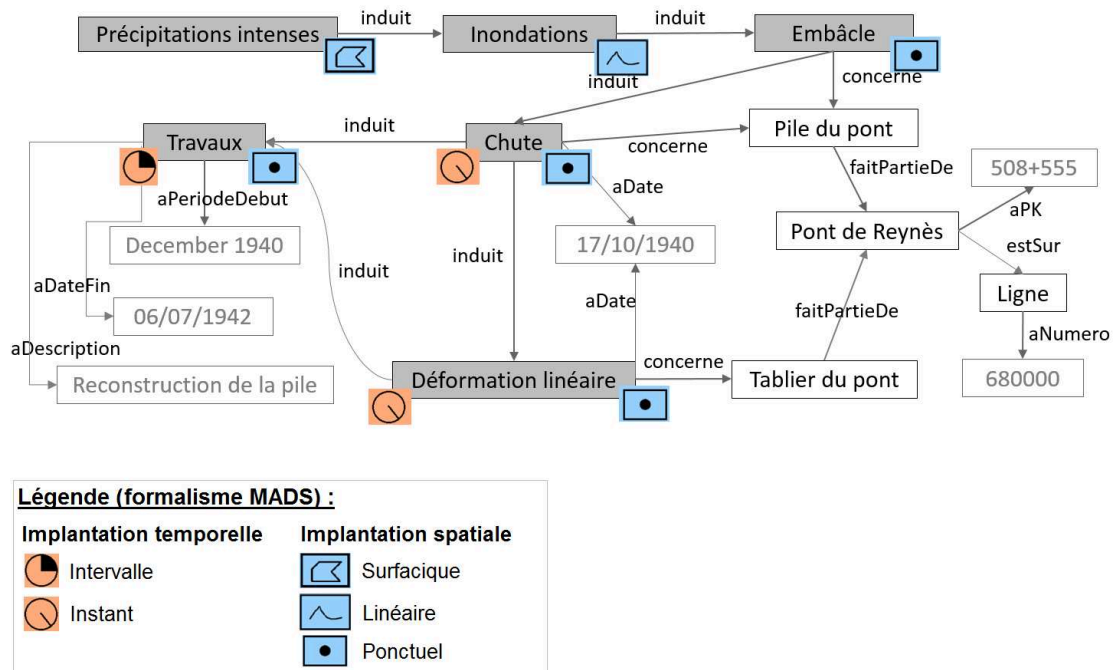


Figure 4.1. Extrait d'instanciation de l'ontologie IDISFER sur l'exemple de l'inondation de 1940 dans les Pyrénées-Orientales. Les indications sur l'implantation spatiale et temporelle des objets utilisent le formalisme MADS (Vangenot et al., 2002; Spaccapietra et al., 2007)

Dans le cadre de ce travail, nous avons contourné ce problème en réduisant les entités à une granularité ponctuelle unique, que ce soit dans le temps ou dans l'espace (Figure 4.2).

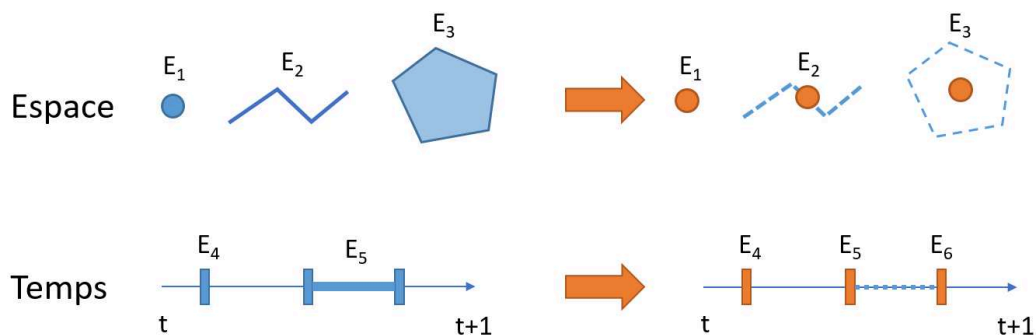


Figure 4.2. Méthode de simplification des événements de granularités spatiales et temporelles hétérogènes

Au niveau spatial, les objets linéaires ou surfacciques sont réduits à leur barycentre (ou le point le plus proche situé à l'intérieur du polygone ou sur la polyligne) avant projection dans la carte.

Au niveau temporel, nous avons réduits tous les évènements à des instants (c'est-à-dire des événements ponctuels dans le temps), en fragmentant les intervalles en un événement début (ex : « début des travaux de réparation ») et un événement fin (ex : « fin des travaux de réparation »). Les dates ont ensuite été harmonisées à la granularité de la journée, ce qui vaut à la fois pour les horaires plus précis que la granularité du jour (ex : à 5h40 le 18 octobre 1940, la voie a été inondée) et pour les dates imprécises (ex : fin des travaux en novembre 1942) pour lesquelles une date plausible en regard des autres événements a été choisie. Lorsqu'une date plausible à la granularité du jour n'existait pas (notamment dans les périodes peu denses en événements telles que la phase post-catastrophe), le premier jour du mois a été choisi.

Soient $(S_j)_{j=1\dots n}$ les n sommets de l'entité géométrique correspondant à un événement $e \in \text{IDISFER}$ dans la carte.

Soit $\text{bar}(x_1, \dots, x_n)$ le barycentre des points x_1 à x_n .

Alors, $\mathcal{P}(e) = \text{bar}((S_j)_{j \in \{1..n\}})$

$\forall e_i \in \text{IDISFER}, \exists \mathcal{D}(e_i)$, où \mathcal{D} est la fonction associant un intervalle temporel à l'événement e_i .

$\mathcal{D}(e_i) = (D_{i,1}, D_{i,2})$, où $D_{i,1}$ est la date de début et $D_{i,2}$ est la date de fin de l'intervalle dans lequel est localisé e_i .

Si e_i est localisé à une date ponctuelle, alors $\mathcal{D}(e_i) = ((A_i, M_i, J_i, H_i, N_i), 0)$,

où $A_i \in E$ représentent la valeur de l'année, $M_i \in \{1, \dots, 12\}$ la valeur du mois, $J_i \in \{1, \dots, 31\}$ la valeur du jour, $H_i \in \{0, \dots, 23\}$ la valeur de l'heure et $N_i \in \{0, \dots, 59\}$ la valeur de la minute. Ces valeurs sont alimentées par les valeurs stockées dans l'ontologie.

Si e_i est localisé dans une durée, alors $\mathcal{D}(e_i) = ((A_i, M_i, J_i, H_i, N_i), (A_j, M_j, J_j, H_j, N_j))$.

$\forall e_i \in \text{IDISFER}, \exists \mathcal{F}(e_i)$, tel que $\mathcal{F}(e_i)$ est la représentation de la date de l'événement e_i destinée à être visualisée dans l'interface.

Soient deux événements $e_1, e_2 \in \text{IDISFER}$, tels que :

$\mathcal{D}(e_1) = ((A_1, M_1, J_1, H_1, N_1), 0)$, c'est-à-dire que e_1 est localisé à une date ponctuelle, et

$\mathcal{D}(e_2) = ((A_{2,1}, M_{2,1}, J_{2,1}, H_{2,1}, N_{2,1}), (A_{2,2}, M_{2,2}, J_{2,2}, H_{2,2}, N_{2,2}))$, c'est-à-dire que e_2 est situé dans un intervalle temporel.

Alors :

$\mathcal{I}(e_1) = \mathcal{D}'(e_{1,1}) = ((A_1, M_1, J_1), 0)$, où \mathcal{D}' est une généralisation de \mathcal{D} .

Note : A ce stade du processus, M_1 ou J_1 sont toujours connus, même dans le cas où la date est imprécise, car ils ont été renseignés et qualifiés dans l'ontologie.

$\mathcal{I}(e_2) = (\mathcal{D}'(e_{2,1}), \mathcal{D}'(e_{2,2})) = (((A_{2,1}, M_{2,1}, J_{2,1}), 0), ((A_{2,2}, M_{2,2}, J_{2,2}), 0))$.

1.1.3. Représentation du type d'événement

Il est important pour les experts métier de distinguer sur la carte les différents types d'événements survenus pendant l'inondation, afin de pouvoir cibler ceux relatifs à leurs objets d'intérêts. Le type d'événement est une donnée qualitative nominale. Selon les règles de la sémiologie graphique, la forme est une variable relativement adaptée pour représenter des données nominales et possède un pouvoir d'association des objets semblables (cf. section II.1.1.2).

Bien qu'elle ne fasse pas partie des variables visuelles décodées de manière pré-attentive (cf. section IV.2.1.4) et ne figure donc pas parmi les plus saillantes, la forme permet d'employer des symboles iconiques (cf. section II.1.1.2) qui possèdent des caractéristiques favorisant la lecture :

- Selon la loi de familiarité de la Gestalt, en utilisant des métaphores connues des lecteurs de la carte, les symboles iconiques peuvent accélérer le décodage de l'information (cf. IV.2.2).
- Ils peuvent aussi favoriser la compréhension et la mémorisation de l'information, en faisant ressortir la sémantique contenue dans les symboles cartographiques (cf. IV.2.2 et IV.2.3.1).

La forme des symboles doit rester simple pour faciliter la perception visuelle selon la loi de concision de la Gestalt (cf. IV.2.1.2). Nous retiendrons donc des symboles évocateurs aux formes stylisées.

Les types d'événements survenus pendant une inondation sont variés et nombreux. Or, le nombre de symboles dans une catégorie de la légende ne doit idéalement pas dépasser 7 +/- 2 pour rester lisible et mémorisable (cf. IV.2.3.1). Nous avons donc choisi d'attribuer des symboles par catégorie d'événement, ces catégories correspondant aux sous-classes héritant directement de la classe « événement » de l'ontologie IDISFER. Il s'agit des catégories : « phénomène naturel », « incident », « perturbation des circulations » et « mesure de réaction » (cf. section III.4.2). Cette règle a cependant deux exceptions, relatives à la classe « incidents » et la classe « mesures de réaction ».

En ce qui concerne les incidents sur le système ferroviaire, nous posons le postulat qu'il est

utile de les catégoriser en fonction des classes d'objets ferroviaires impactées, afin de permettre aux experts métier d'identifier facilement les impacts des inondations sur leurs objets d'étude. La symbologie attribuée aux incidents varie donc en fonction du type d'objet ferroviaire qu'ils ont endommagé (Figure 4.3).

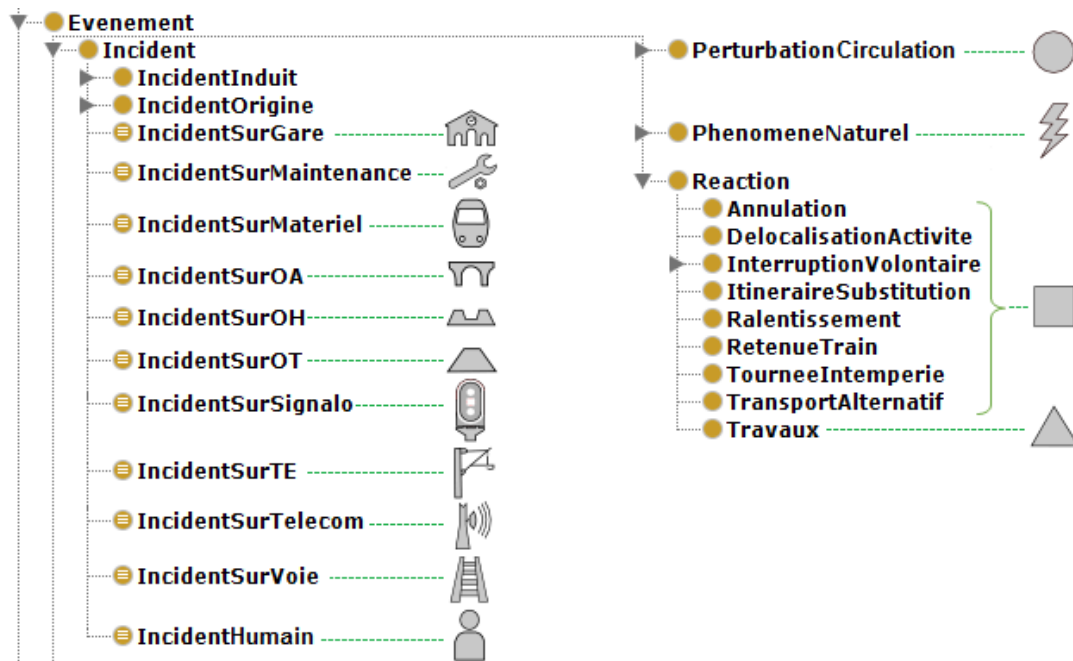


Figure 4.3. Correspondance entre les classes d'événements d'IDISFER et les symboles cartographiques qui leur sont appliqués

Dans la catégorie des mesures de réaction, les événements de travaux se distinguent des autres car ils concernent les composants de l'infrastructure ferroviaire, qui sont les objets d'intérêt de notre public cible, tandis que les autres mesures de réaction concernent la régulation des circulations. Par conséquent, les travaux sont distingués visuellement des autres types de mesures de réaction par un symbole qui leur est propre (cf. Figure 4.3).

Des symboles iconiques ont été attribués aux événements d'« incidents » et aux « phénomènes naturels », qui sont les plus intéressants pour le public d'hydrologues (cf. section I.3.3), tandis que des symboles abstraits ont été attribués aux « perturbations des circulations » et aux « mesures de réaction ». Cette distinction en deux groupes visuels (iconiques, face à abstraits) a pour but d'augmenter les différences visuelles entre symboles donc de faciliter la catégorisation des événements lors de la lecture, ce qui a pour conséquence de faciliter leur intégration dans les représentations mentales des lecteurs (cf. IV.2.2.1). Les symboles iconiques d'incidents reprennent ceux de la charte graphique de l'entreprise SNCF, qui sont familiers de notre public cible, ce qui peut accélérer leur détection et leur lecture (cf. sections IV.2.1.2 et IV.2.2.2).

Soit $\mathcal{F} : e \mapsto \mathcal{F}(e)$ la fonction qui attribue une forme au symbole de l'événement e sur la

carte.

Soit E un sous-ensemble d'instances de concepts, héritant d'une même classe d'IDISFER, tel que $E \in \text{IDISFER}$.

On note $\mathcal{F}(E)$ la forme attribuée à tous les événements appartenant à E . Ainsi, $\forall e \in E$ on peut noter $\mathcal{F}(e) = \mathcal{F}(E)$.

Soit *INCIDENTS* l'ensemble des événements héritant de la classe « Incident » d'IDISFER. Par analogie, soient *PERTURBATIONS*, *PHENOMENES*, *REACTIONS* et *TRAVAUX* les ensemble d'événements héritant respectivement des classes « perturbations des circulations », « phénomènes naturels », « mesures de réaction » et « travaux » d'IDISFER.

$\forall e \in \text{PHENOMENES}, \mathcal{F}(e) = \mathcal{F}(\text{PHENOMENES})$

$\forall e \in \text{PERTURBATIONS}, \mathcal{F}(e) = \mathcal{F}(\text{PERTURBATIONS})$

$\forall e \in \text{REACTIONS}, \begin{cases} \text{Si } e \in \text{TRAVAUX}, \mathcal{F}(e) = \mathcal{F}(\text{TRAVAUX}) \\ \text{Si } e \notin \text{TRAVAUX}, \mathcal{F}(e) = \mathcal{F}(\text{REACTIONS}) \end{cases}$

$\forall e \in \text{INCIDENTS}, \mathcal{F}(e)$ dépend de la nature du composant impacté par e , retrouvé par inférences selon le prédicat *aUnImpactSur* (voir la Figure 4.3 pour la liste exhaustive).

1.1.4. Représentation de la date

Selon la sémiologie graphique, la date peut être considérée soit comme une variable quantitative, soit comme une variable qualitative ordinale (cf. section V.2.2.1). Une variable visuelle adaptée à la fois à ces deux conceptions est la valeur de la couleur (Bertin, 1967). L'application d'une échelle de valeur progressive à la date des événements de notre carte peut permettre au lecteur de distinguer les événements anciens des plus récents et de repérer l'ordre chronologique.

En raison du grand nombre de dates unitaires sur les périodes perturbées suite aux inondations, nous décidons d'appliquer des teintes différentes par période de l'inondation, périodes segmentées en regard des phénomènes naturels comme le proposaient Davoine et al. (2012). L'attribution d'une valeur de la couleur aux symboles d'événements requiert donc deux étapes :

- d'abord identifier à quelle période de l'inondation appartient un événement,
- ensuite lui attribuer une valeur de la couleur selon son rang dans la période.

Segmentation de l'inondation en périodes

La première période est celle de l'inondation au sens propre, durant laquelle les

phénomènes hydro-climatiques se déroulent. Dans cette période, les événements et les dates sont nombreux : la valeur de la couleur en double progression est donc utilisée pour différencier les périodes de régime de *crue* et de *décrue*. Les couleurs attribuées à la double progression ont été choisies en fonction de leur symbolique dans la culture occidentale : le rouge symbolisant une période de danger pour la première et le vert un retour au calme pour la seconde. Les couleurs utilisées sont saturées et intenses pour rendre saillants les événements survenus dans cette période (cf. section IV.2.1.3 et IV.2.1.4), qui sont a priori les plus importants pour notre public cible.

La période suivante, correspondant aux *réactions* à l'inondation, est représentée par une échelle de couleur voisine sur le cercle chromatique de celle utilisée pour représenter la période précédente (Figure 4.4). L'objectif est de favoriser la perception d'une continuité dans le déroulement temporel, malgré le changement de teinte. Le nombre de dates unitaires étant là-aussi trop élevé, la période post-inondation a été segmentée en trois périodes dénommées « *court-terme* », « *moyen-terme* » et « *long-terme* ». Ces périodes sont segmentées automatiquement en détectant les discontinuités temporelles qui les séparent, c'est-à-dire des espacements temporels entre événements possédant une durée importante par rapport à la fréquence des événements. Des teintes différentes ont été appliquées à ces trois périodes, toujours en progression sur le cercle chromatique.



Figure 4.4. Cercle chromatique d'Itten (1961)

Soit $p(e)$ la fonction qui associe une période à l'événement e selon sa date, parmi les valeurs suivantes : $p(e) \mapsto \{ \text{"PRECEDENT DE L'INONDATION"}, \text{"CRUE"}, \text{"PIC DE CRUE"}, \text{"DECRUE"}, \text{"COURT TERME"}, \text{"MOYEN TERME"}, \text{"LONG TERME"} \}$.

Soient $(D_i)_{i=1 \dots N}$, les dates associées aux N événements d'IDISFER $(e_i)_{i=1 \dots N}$, classés dans l'ordre chronologique. Et soient D_A la date de l'événement « début de l'inondation », D_B la date de l'événement « pic de la crue » et D_C la date de l'événement « fin de la décrue ».

$\forall D_i < D_A, p(e_i) = \text{"PRECEDENT DE L'INONDATION"}$

$\forall D_i$ où $D_A \leq D_i < D_B, p(e_i) = \text{"CRUE"}$

$\forall D_i = D_B, p(e_i) = \text{"PIC DE CRUE"}$

$\forall D_i$ où $D_B < D_i \leq D_C$, $p(e_i) = \text{"DECRUE"}$

$$\forall D_i > D_C, \begin{cases} \text{Si } D_i = D_{C+1}, \text{ alors } p(e_i) = \text{"COURT TERME"} \\ \text{Si } D_i \neq D_{C+1} \text{ et } p(e_{i-1}) = \text{"COURT TERME"} \text{ et } (D_i - D_{i-1}) > \alpha \times (D_{i-1} - D_{i-2}), \\ \text{alors } p(e_i) = \text{"MOYEN TERME"} \\ \text{Si } D_i \neq D_{C+1} \text{ et } p(e_{i-1}) = \text{"MOYEN TERME"} \text{ et } (D_i - D_{i-1}) > \alpha \times (D_{i-1} - D_{i-2}), \\ \text{alors } p(e_i) = \text{"LONG TERME"} \\ \text{Si } D_i \neq D_{C+1} \text{ et } p(e_{i-1}) = \text{"LONG TERME"}, \text{ alors } p(e_i) = \text{"LONG TERME"} \end{cases}$$

où α est un facteur seuil au-delà duquel un intervalle temporel est considéré comme « large », entraînant le changement de période temporelle.

L'observation de nos cinq cas d'étude d'inondations nous permet de proposer $\alpha = 6$ (i.e. si un intervalle entre deux événements est au moins 6 fois plus grand que l'intervalle séparant les deux derniers événements, alors il faut changer de période). Ce chiffre nécessiterait cependant d'être validé avec un plus grand nombre de cas d'études.

Attribution d'une couleur à chaque date

Il n'est pas nécessaire d'avoir le même niveau de précision dans la distinction des dates sur l'ensemble de la période perturbée par l'inondation : dans les premiers jours de l'inondation, il est utile de distinguer les dates précises des événements qui se succèdent, pour reconstituer leur chronologie. Mais il n'est pas nécessaire pour les utilisateurs de connaître les dates unitaires de tous les événements de travaux : la perception de leur ordre et de leur répétition au cours du temps est suffisante pour la lecture du récit. Cela a deux conséquences dans les choix de représentation de la date.

Premièrement, les événements à moyen-terme et à long-terme, qui sont rares et très espacés dans le temps, ont été regroupés sous une teinte unique, sans dégradé de couleur. Il paraît en effet moins utile de distinguer visuellement les dates précises de ces événements, dates qui sont par ailleurs rarement citées à la granularité du jour dans les documents.

Cette méthode présente l'intérêt de limiter le nombre de couleurs co-existant dans l'interface et donc, a priori, elle diminue la charge visuelle ce qui simplifie la lecture.

Soit $\mathcal{C}(e)$ la fonction qui associe une couleur à l'événement e .

$\mathcal{C} : e \mapsto (R,V,B)$, où le triplet (R,V,B) désigne une couleur dans le système de codage « rouge, vert, bleu » et où $R, V, B \in [0;255]$.

$\forall e_i \in \text{IDISFER},$

$\mathcal{C}(e_i) =$

Si $p(e_i) = \text{"PRECEDENT DE L'INONDATION"}$, alors $\mathcal{C}(e_i) = (250, 250, 226)$
 Si $p(e_i) = \text{"PIC DE CRUE"}$, alors $\mathcal{C}(e_i) = (255, 221, 0)$
 Si $p(e_i) = \text{"MOYEN TERME"}$, alors $\mathcal{C}(e_i) = (197, 0, 255)$
 Si $p(e_i) = \text{"LONG TERME"}$, alors $\mathcal{C}(e_i) = (238, 215, 244)$
 Si $p(e_i) = \text{"CRUE"}$, alors $\mathcal{C}(e_i)$ prend une couleur parmi $I_{\text{CRUE}} = \{(215, 0, 0), \dots, (255, 149, 128)\}$, où le nombre de couleurs contenues dans le vecteur I_{CRUE} est égal au nombre de dates D_i uniques classées dans la période "CRUE"
 Si $p(e_i) = \text{"DECRUE"}$, alors $\mathcal{C}(e_i)$ prend une couleur parmi $I_{\text{DECRUE}} = \{(216, 240, 0), \dots, (43, 129, 0)\}$
 Si $p(e_i) = \text{"COURT TERME"}$, alors $\mathcal{C}(e_i)$ prend une couleur parmi $I_{\text{COURT}} = \{(214, 214, 255), \dots, (0, 57, 148)\}$

où les valeurs comprises dans I_{CRUE} , I_{DECRUE} et I_{COURT} sont choisies pour maximiser leur différenciation visuelle sur la plage de couleurs.

Deux modes de visualisation des dates ont été implémentés dans la légende : un mode dit contracté (ou plié) et un mode dilaté (ou déplié) (Figure 4.5). Le mode contracté insiste sur l'ordre dans la série temporelle, plus adapté à la lecture des périodes à court, moyen et long-terme, tandis que le mode dilaté met l'emphase sur les dates unitaires, qu'il est plus important d'identifier dans les premiers jours de l'inondation.

Ces deux modalités mettent donc en valeur des temporalités différentes des événements lors de la lecture de la carte. La légende contractée est affichée par défaut dans l'interface et l'utilisateur peut choisir interactivement de passer à la légende dilatée en fonction de sa tâche.

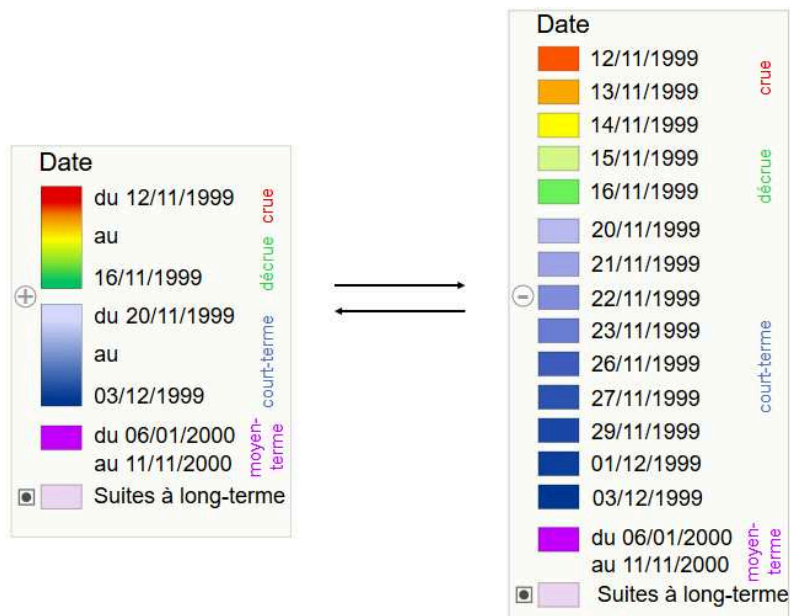


Figure 4.5. Modes contracté (à gauche) et dilaté (à droite) de la légende

1.2. Visualisation incrémentale des événements

Plusieurs événements successifs peuvent être survenus au même emplacement au cours du

temps. Dans l'exemple d'instanciation de l'ontologie présenté sur la Figure 4.1, un phénomène naturel (embâcle), deux dommages (chute de la pile du pont et déformation du tablier) et un événement de travaux se succèdent sur le même ouvrage ferroviaire.

Cette concentration cause des problèmes de densité et de superposition visuelle entre les symboles sur la carte. A titre d'exemple, 379 événements sont survenus pendant l'inondation de 1999 sur la région Languedoc-Roussillon, avec de 1 à 35 événements successifs à chaque localisation impactée sur la voie ferrée. Nous pouvons donc nous inspirer des méthodes de gestion d'entités superposées existantes dans la littérature (cf. section II.1.2.4).

Dans notre cas d'usage, nous souhaitons que les types d'événements et leurs dates unitaires restent visibles malgré la densité de points. Nous retenons donc la méthode de déplacement des points par rapport à leur position initiale. Nous nous inspirons de la carte publiée par Tufté (1990) (Figure 1.20) en déplaçant les événements par rapport à leur localisation initiale et en les alignant selon un axe perpendiculaire aux lignes ferroviaires sur laquelle ils sont survenus dans l'ordre chronologique (Figure 4.6). Nous nommons cette méthode de visualisation la « pile chronologique » d'événements.

Les symboles empilés sont placés dans un cadre blanc qui vise à les abstraire du fond de carte, tout en suggérant qu'ils ne sont pas situés réellement à la localisation qu'ils recouvrent. Le cadre blanc est relié par une ligne à leur localisation véritable sur la voie ferrée.

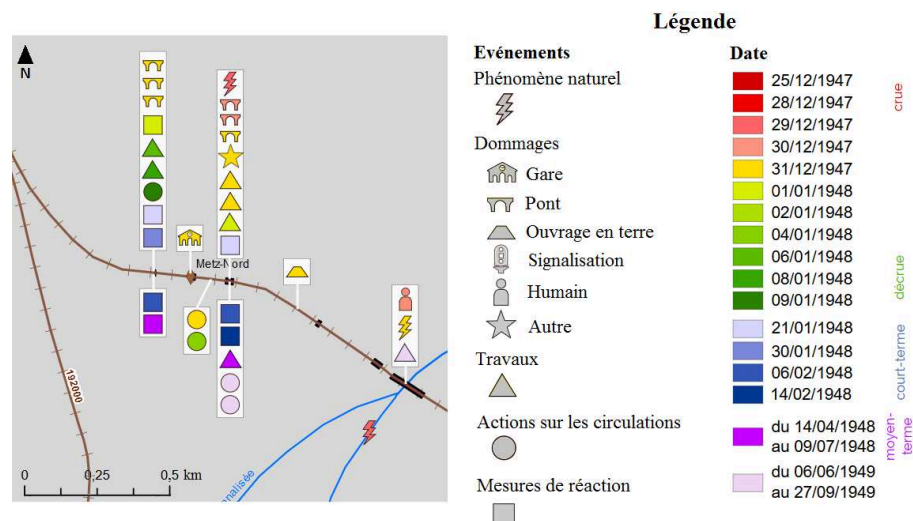


Figure 4.6. Illustration de la méthode de la pile chronologique : les événements survenus à un même endroit au cours du temps sont ordonnés chronologiquement dans un cadre (le plus ancien de la série est placé en haut).

Lorsque le nombre d'événements survenus en un même lieu est trop grand pour qu'un cadre blanc soit visible dans son intégralité dans la carte, ce cadre a été segmenté en plusieurs cadres, parfois placés de part et d'autre du symbole linéaire de la voie ferrée, en fonction de l'espace graphique disponible.

$\forall e_i, e_k \in \text{IDISFER}$, tels que $e_i \neq e_k$

si $\mathcal{P}(e_i) = \mathcal{P}(e_k)$, alors $\mathcal{P}(e_i) = \text{bar}((S_i, j)_{j \in \{1..n\}}) \times \vec{\sigma}_i$, où $\vec{\sigma}_i = (x_i, y_i)$ est le décalage de $\mathcal{P}(e_i)$ par rapport à sa localisation d'origine. De même, $\mathcal{P}(e_k) = \text{bar}((S_k, j)_{j \in \{1..n\}}) \times \vec{\sigma}_k$.

x_i et y_i dépendent :

- de \mathcal{O}_i , l'orientation principale de la voie ferrée (horizontale ou verticale) à proximité de $\mathcal{P}(e_i)$: le décalage des symboles est appliqué dans une direction orthogonale à cette orientation principale,
- du nombre n_A d'événements étant situés au même emplacement que e_i , et stockés dans le même cadre blanc R_A , et du rang chronologique r_i de l'événement e_i parmi ces n_A événements : l'événement e_i sera placé d'autant plus loin de la voie ferrée que le nombre d'événements s'intercalant entre la voie et lui dans le cadre blanc seront nombreux,
- de la proximité dans la carte d'autres cadres blancs R_l (avec $l \in \mathbb{N}$, l'ensemble des entiers), pouvant entraîner une modification de x_i et y_i pour éviter les superpositions graphiques. Notamment, si un autre cadre blanc R_B fait référence à un point très proche du point de référence de R_A , alors R_A et R_B sont éloignés l'un de l'autre pour éviter qu'ils se superposent.

Donc $\vec{\sigma}_i = f(\mathcal{O}_i, n_A, r_i, \{\mathbf{R}_l\}_{l \in \mathbb{N}, l \neq A})$

1.3. Visualisation des relations de causalité entre événements

Nous avons vu qu'il est important pour notre public d'utilisateurs que la carte figure explicitement les effets dominos (cf. section 1.3.3). Par ailleurs, la perception des relations de causalité entre événements est susceptible d'aider les lecteurs à comprendre et mémoriser le récit (cf. section V.4.2).

En nous inspirant des méthodes mises en œuvre dans les cartes de récit, explorées dans la section V.4.3.2., nous figurons les relations de causalité entre événements par des lignes pleines reliant chaque événement cause à ses conséquences.

Soit $r_{i,j} \in \text{IDISFER}$ une relation de causalité entre deux événements e_i et e_j .

Soit $\mathcal{L}(r_{i,j})$ la projection sous forme linéaire de la relation $r_{i,j}$ sur la carte.

$\forall e_i, e_j, e_k \in \text{IDISFER}$, tels que e_i est la cause de e_j et e_k est la conséquence de e_j , $\exists \mathcal{L}(r_{i,j})$ et $\exists \mathcal{L}(r_{j,k})$.

$\mathcal{L}(r_{i,j})$ (comme $\mathcal{L}(r_{j,k})$) est une courbe de Béziérs de degré 2, de point de départ $\mathcal{P}(e_i)$

(respectivement $\mathcal{P}(e_j)$) et de point d'arrivée $\mathcal{P}(e_j)$ (respectivement $\mathcal{P}(e_k)$).

Si $\mathcal{P}(e_i)=(x_i,y_i)$ et $\mathcal{P}(e_j)=(x_j,y_j)$, le troisième point de contrôle de la courbe $\mathcal{L}(r_{i,j})$ a pour coordonnées $P_3 = \left(\frac{x_j - x_i}{2} + \beta; \frac{y_j - y_i}{2} \right)$, où $\beta \in \mathbb{R}$ (l'ensemble des réels) est un facteur d'incurvation de la courbe. Dans notre carte, nous avons fixé $\beta = -30$ pixels si e_j est la cause de e_i et $\beta = +30$ pixels si e_j est la conséquence de e_i .

La courbe $\mathcal{L}(r_{i,j})$ a pour équation : $B_{ij}(t) = (1-t)^2\mathcal{P}(e_i) + 2t(1-t)P_3 + t^2\mathcal{P}(e_j)$, avec $t \in [0;1]$.

Par analogie, l'équation de la courbe $\mathcal{L}(r_{j,k})$ est $B_{jk}(t) = (1-t)^2\mathcal{P}(e_j) + 2t(1-t)P_4 + t^2\mathcal{P}(e_k)$, avec $t \in [0;1]$ et $P_4 = \left(\frac{x_k - x_j}{2} + \beta; \frac{y_k - y_j}{2} \right)$.

Ces lignes de causalités sont nombreuses et ne peuvent pas être toutes affichées simultanément, sous peine de surcharger la carte et de masquer les symboles d'événements. C'est pourquoi, ces lignes ne sont affichées que sur demande interactive de l'utilisateur : en cliquant sur le symbole d'un événement, les lignes le reliant à sa (ses) cause(s) et à sa (ses) conséquence(s) apparaissent (Figure 4.7).

La couleur des lignes distingue les causes, reliées par des lignes rouges à l'événement cliqué, et les conséquences, qui lui sont liées par des lignes noires⁵⁵. En effet, selon les règles de la sémiologie graphique (Bertin, 1967), la couleur est très adaptée à la visualisation de données qualitatives nominales mais elle n'est pas extrêmement adaptée aux symboles linéaires.

Soit $\mathcal{C}(r_{i,j})$ la fonction qui attribue une couleur à la relation entre e_i et e_j sur la carte.

$$\forall e_i, e_j, e_k \in \text{IDISFER}, \begin{cases} \text{si } e_i \text{ est la cause de } e_j, \text{ alors } \mathcal{C}(r_{i,j}) = (212,0,86) \\ \text{si } e_k \text{ est la cause de } e_j, \text{ alors } \mathcal{C}(r_{j,k}) = (0,0,0) \end{cases}$$

⁵⁵ Notons que dans le cadre de cette recherche, nous avons testé la variable couleur auprès des utilisateurs, mais d'autres méthodes pourraient être employées (par exemple des variations de texture : trait plein, pointillé).

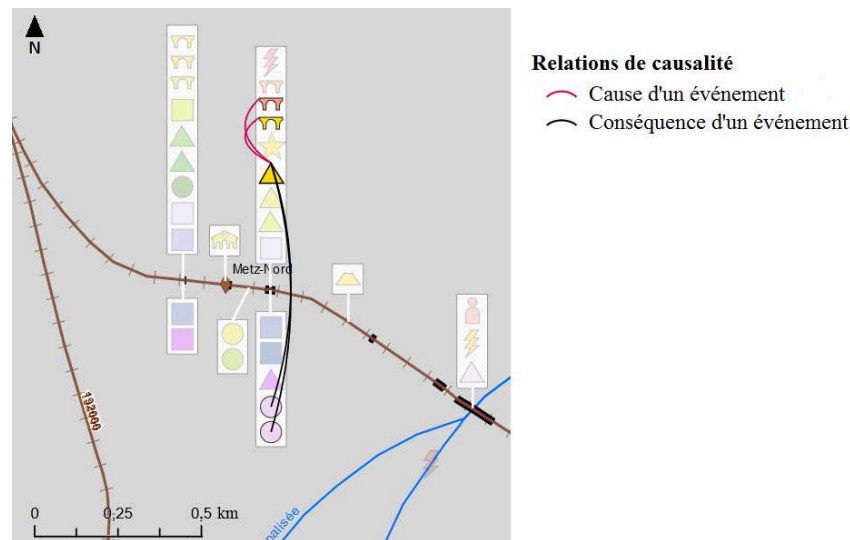


Figure 4.7. Affichage des relations de causes et conséquences d'un événement sur demande grâce au clic.

1.4. Gestion de la diversité des échelles spatiales et temporelles

Les inondations majeures peuvent impacter de larges zones à l'échelle d'une région. Les événements ont également une répartition spatiale hétérogène. Ils se concentrent souvent dans des zones précises, qui correspondent à celles qui sont les plus vulnérables aux phénomènes hydro-climatiques, et ils sont situés en majorité le long des axes ferroviaires. Cette distribution hétérogène pose plusieurs problèmes.

1.4.1. Visualisation des relations de causalités lointaines

Tout d'abord, la visualisation de ces événements risque d'aboutir à de larges espaces vides, à petite échelle, alternant avec des zones où les événements sont trop proches pour être distinguables les uns des autres. Il paraît donc nécessaire de proposer plusieurs échelles de lecture de la carte, pour permettre au lecteur de distinguer les événements survenus sur chaque zone. Cela peut être réalisé en implémentant simplement des fonctionnalités de zoom et de déplacement dans l'emprise de la carte. Cependant cela soulève un second problème.

La multiplicité des échelles de lecture pose la question de savoir comment représenter les relations existantes entre des événements spatialement distants, ne figurant pas dans l'emprise de la carte en cours de consultation. Pour cela, nous proposons d'associer un « encart contextuel » à la carte, dans lequel s'affichent tous les événements qui sont en relation avec des événements situés dans l'emprise de la carte principale mais qui se trouvent hors de cette emprise (Figure 4.8). Ce procédé visuel correspond à l'affichage d'une partie du contexte spatial en parallèle de la vue principale, selon la méthode du « *focus + context* » (cf. section II.1.2.3).

L'encart figure une vue globale de la zone touchée par l'inondation pour indiquer que les

événements qu'il contient sont situés quelque part dans cet espace.

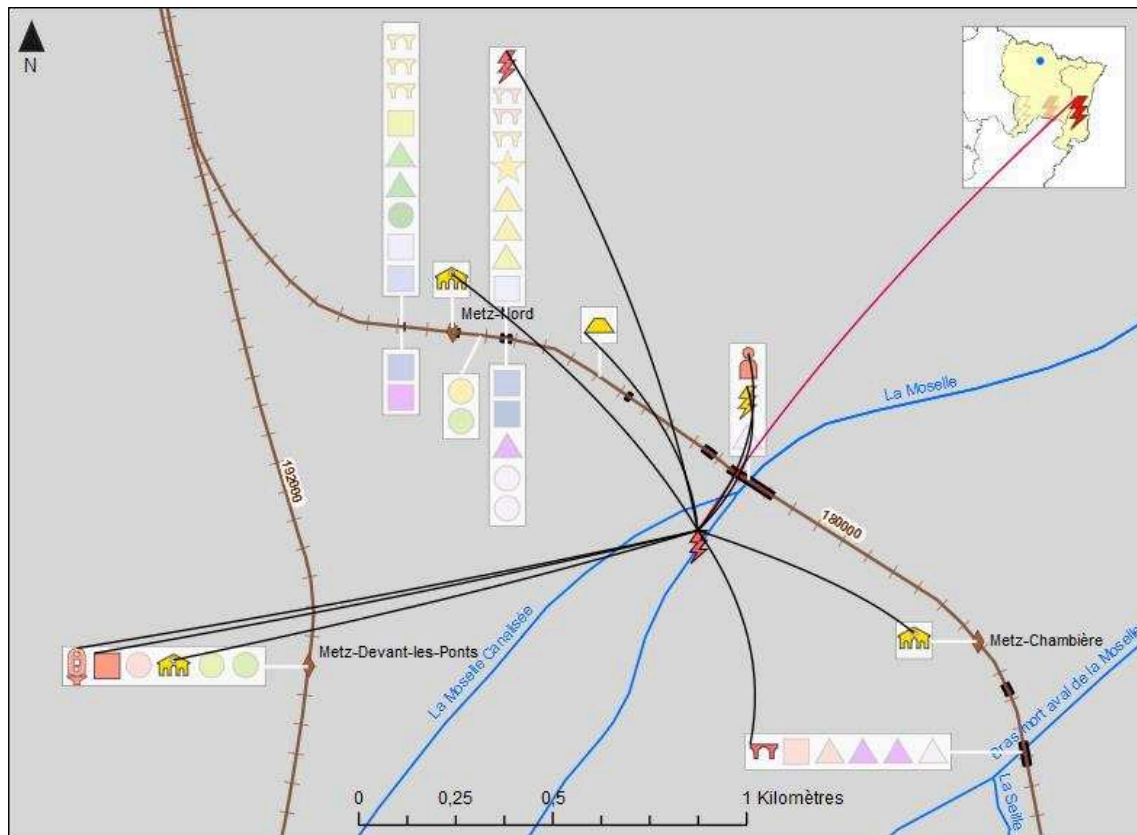


Figure 4.8. Affichage d'une relation de causalité entre un événement situé dans l'emprise de la carte et un événement spatialement distant, affiché dans l'encart contextuel accompagnant la carte

Soit l'espace de la carte délimité par les points de coordonnées (0,0), pour le coin supérieur gauche, et (X,Y), pour le coin inférieur droit.

Considérant deux événements e_i et e_j liés par une relation de causalité, si $\mathcal{P}(e_i)$ se trouve dans l'emprise de la carte mais $\mathcal{P}(e_j)$ ne se trouve pas dans l'emprise de la carte, alors e_j apparaît dans l'encart contextuel, à une nouvelle localisation $\mathcal{P}'(e_j)$.

Dans notre formalisme, cela peut s'exprimer comme :

$\forall e_i, e_j \in \text{IDISFER},$

si $\exists (r_{i,j} \text{ ou } r_{j,i})$ ET $(x_i > 0 \text{ et } x_i < X \text{ et } y_i > 0 \text{ et } y_i < Y)$ ET $(x_j < 0 \text{ ou } x_j > X \text{ ou } y_j < 0 \text{ ou } y_j > Y),$

alors $\mathcal{P}'(e_j) = \text{bar}((S_{j,i})_{i \in \{1..n\}}) \times \vec{\delta}_j$, où $\vec{\delta}_j = (x_j, y_j)$ est le décalage de e_j par rapport à sa localisation initiale.

$\vec{\delta}_j$ dépend :

- des coordonnées de l'encart contextuel dans l'espace graphique, notées

$\{(x_a, y_a), (x_b, y_b)\}$: les coordonnées finales de $\mathcal{P}'(e_j)$ devront être situées dans les bornes de cet encart,

- du nombre d'événement n_D affichés dans l'encart et du rang chronologique r_j de l'événement e_j parmi les n_D événements.

Donc $\vec{\delta}_j = f(x_a, y_a, x_b, y_b, n_D, r_j)$.

Parallèlement, $\forall e_i, e_j, e_k \in \text{IDISFER}$, tels que e_j a pour cause e_i et a pour conséquence e_k , si $\mathcal{P}(e_j)$ ne se trouve pas dans l'emprise de la carte, alors $\mathcal{L}'(r_{i,j})$ et $\mathcal{L}'(r_{j,k})$ seront utilisées à la place de $\mathcal{L}(r_{i,j})$ et $\mathcal{L}(r_{j,k})$ pour relier les événements entre la carte et l'encart contextuel.

En notant $\mathcal{P}'(e_j) = (x_j, y_j)$, alors l'équation de $\mathcal{L}'(r_{i,j})$ (et, par analogie, de $\mathcal{L}'(r_{j,k})$) sera :

$$B_{ij'}(t) = (1-t)^2 \mathcal{P}(e_i) + 2t(1-t)P_5 + t^2 \mathcal{P}'(e_j), \text{ avec } t \in [0;1] \text{ et } P_5 = \left(\frac{x_j - x_i}{2} + \beta, \frac{y_j - y_i}{2} \right).$$

1.4.2. Visualisation à petite échelle

A une petite échelle, les événements survenus pendant l'inondation sont trop nombreux pour pouvoir être tous affichés de façon lisible dans l'emprise de la carte, selon la méthode des piles chronologiques. Pour pallier ce problème, il est possible de définir un seuil maximum d'événements (que nous avons fixé arbitrairement à 70 événements, mais qui devra être justifié par des preuves expérimentales) au-delà duquel la vue cartographique sera simplifiée en recourant à des méthodes d'agrégation des points proches (cf. section VI.1.2.1). Le nombre d'événements par zone de la carte est alors figuré par des cercles proportionnels (cf. Figure 4.9).

Si le nombre d'événements à afficher dans l'emprise de la carte passe en dessous du seuil fixé, soit que l'utilisateur ait filtré certaines catégories d'événements soit qu'il ait zoomé sur une zone plus restreinte, alors la visualisation cartographique bascule automatiquement sur les piles chronologiques d'événements.

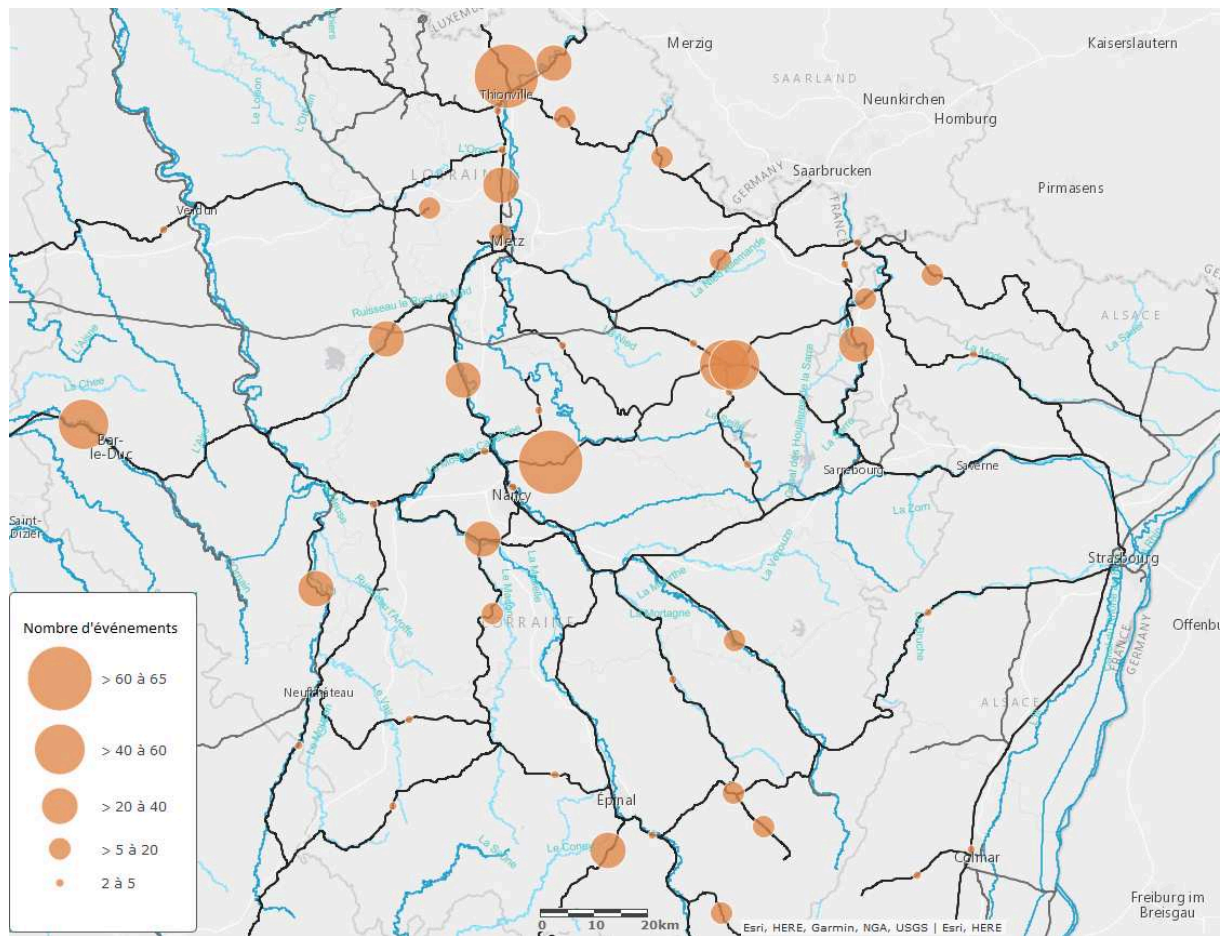


Figure 4.9. Carte à petite échelle montrant le nombre d'événements sous forme de cercles proportionnels

Soit v le nombre d'événements $\{e_1, \dots, e_v\} \in \text{IDISFER}$ visibles dans l'emprise courante de la carte.

Si $v < 70$, alors $\{e_1, \dots, e_v\} \rightarrow \{\mathcal{P}(e_1), \dots, \mathcal{P}(e_v)\}$

Si $v > 70$, alors les événements sont convertis en cercles, de tailles proportionnelles au nombre d'événements qu'ils représentent, et agrégés selon la méthode de Jänicke et al. (2012) :

Deux cercles proportionnels c_i et c_j représentant des événements sont agrégés si la distance $d_{i,j}$ qui les sépare est plus petite que la somme de leurs rayons r_i et r_j .

On pose $\Psi_{i,j}$ l'indice de dissimilarité, permettant de conclure si deux cercles c_i et c_j doivent être agrégés.

$$\Psi_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{r_i + r_j + \varepsilon}, \text{ où } \varepsilon \text{ représente la plus petite distance tolérée entre deux cercles.}$$

Si $\Psi_{i,j} < 1$, alors les cercles c_i et c_j sont agrégés en un nouveau cercle $c_{i,j}$ placé en leur barycentre.

En l'état, la carte synthétisée en cercles proportionnels ne permet pas d'accéder au détail des événements formant le récit, ni à une lecture fine des relations de causalités entre événements. Pour pouvoir associer plus d'informations à la représentation en cercles proportionnels, il semblera nécessaire de recourir à des modules complémentaires liés dynamiquement à la carte, en l'intégrant au sein d'un environnement de géovisualisation plus riche.

Nous avons donc défini des règles de représentations systématiques pour visualiser les événements de l'ontologie IDISFER et leurs relations de causalité dans une carte retranscrivant le récit de l'inondation. Cette carte a été intégrée dans un environnement de géovisualisation, interactif et animé, permettant à l'utilisateur d'explorer les liens entre dimensions spatiales et temporelles et d'accéder à plus d'informations (cf. section II.1.2.1). La section suivante présente la structure de l'interface, les fonctions qui ont été intégrées dans l'application et la conception de l'animation temporelle montrant la dynamique des événements.

2. Géovisualisation dynamique du récit des événements

La carte de récit d'une inondation a été intégrée dans un environnement de géovisualisation. Comme nous l'avons vu dans la section II.1.2, ce type d'environnement permet d'analyser des volumes de données plus grand, en fournissant à l'utilisateur des fonctions pour naviguer dans les données, d'une vue générale vers le détail, et pour modifier la forme visuelle sur demande.

L'interface intègre (Figure 4.10) :

- une carte centrale,
- une ligne de temps (située sous la carte),
- une fenêtre attributaire descriptive (sur la gauche de la Figure),
- une légende interactive (sur la droite),
- des menus déroulants pour modifier l'apparence de la carte ou de la ligne de temps (situés en haut de l'écran).

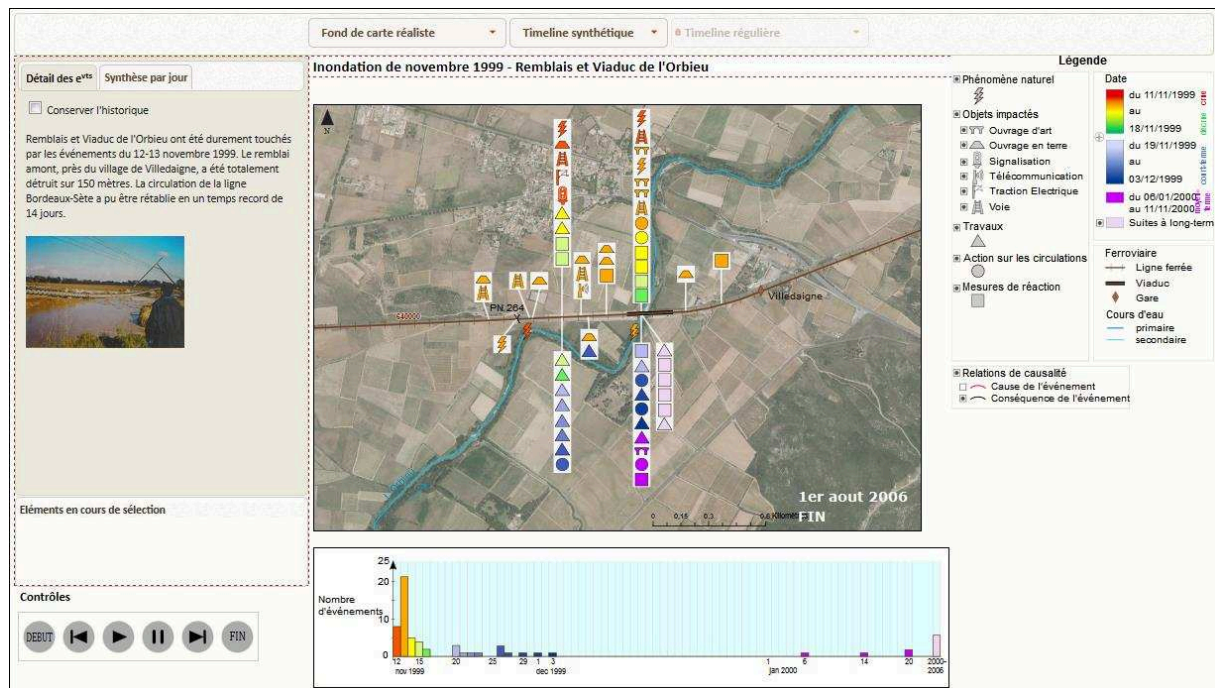


Figure 4.10. Interface de géovisualisation du récit d'une inondation historique

2.1. Fonctionnalités d'exploration des événements

Cette interface intègre des fonctions classiques (Zanin et al., 2013) caractérisant les environnements de géovisualisation :

- le zoom et le déplacement dans la carte,
- la sélection d'événements par clic, qui affiche des informations descriptives sur cet événement dans une fenêtre la fenêtre attributaire,
- le filtre des événements ou des relations de causalité par catégorie et
- la sélection du fond de carte parmi une liste de choix (photo aérienne, réclamée par les utilisateurs mais comportant des éléments saillants susceptibles de distraire l'attention, ou fond de carte schématique, simplifié et neutre pour faciliter la distinction figure-fond – cf. section IV.2.1).

Pour comprendre le récit, l'utilisateur doit en particulier accéder aux descriptions littéraires des événements, afin de retracer la chronologie des faits. C'est une fonction qui manquait dans l'application de récit cartographique AtlasCiné que nous avons étudiée dans la section V.4.3.2. Le filtre et la sélection répondent à ce besoin, en permettant également de faire un tri parmi les événements affichés, donc de s'adapter à la diversité des objectifs de l'utilisateur, comme le préconise l'axiome de relativité de la cindynique (cf. section II.2.1.2).

Afin de permettre au lecteur de suivre plus aisément le fil de la chronologie et des relations de causalités entre événement, un bouton intitulé « conserver l'historique » a été implanté

dans la fenêtre descriptive. En le cochant, il permet à l'utilisateur de compiler les descriptions des événements cliqués dans leur ordre de sélection, à la manière d'un bloc note. Cette fonction permet également de répondre au besoin de collecte de données textuelles en vue de les intégrer dans des rapports, qui avait été exprimé par les utilisateurs (cf. section I.3.4.1).

Comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, de nombreuses géovisualisation de récit intègrent des cartes animées (cf. section V.4.3.). Les travaux sur la perception de cartes animées démontrent que cette modalité est complémentaire des cartes seulement interactives, chacune permettant de percevoir des caractéristiques spatiales et temporelles différentes (cf. section V.3.3). C'est pourquoi, nous avons intégré ces deux modalités dans notre visualisation.

2.2. Animation du récit

Les propositions de représentation des événements et de leurs relations de causalité ont été converties au format animé. Dans notre visualisation, l'animation suit un « scénario préconstruit », selon la typologie de Klein (2007) (cf. section V.2.2.2), qui ne peut pas être modifié par l'utilisateur. L'animation est en revanche pourvue de contrôles interactifs, ce qui est nécessaire pour garantir sa lisibilité (cf. section V.3.2.2).

L'apparition des événements a été échelonnée dans plusieurs scènes successives, ordonnées selon l'ordre chronologique de l'histoire de l'inondation. Un événement et sa conséquence apparaissent toujours dans deux scènes distinctes. L'affichage des relations de causalité fait le lien entre deux scènes successives. Ainsi, dans le cas de figure où plusieurs événements liés par des effets dominos sont survenus un même jour, une journée de temps réel de l'inondation sera représentée par plusieurs scènes dans l'animation. Le temps s'écoulant dans l'animation n'est donc pas proportionnel au temps réel.

La Figure 4.11 illustre l'enchaînement de deux scènes de l'animation :

- 1) si la scène correspond à une nouvelle date par rapport à la scène précédente, la date du jour apparaît,
- 2) le ou les événements attribués à la scène apparaissent et clignotent à deux reprises, ce qui doit permettre de capter l'attention du lecteur (cf. section IV.2.1.4),
- 3) une ligne de conséquence apparaît, reliant l'événement cause à sa conséquence. Elle est parcourue par un figuré circulaire jaune qui montre l'orientation de la relation, de la cause vers la conséquence,
- 4) l'événement conséquence apparaît par clignotement,

5) la ligne de causalité disparaît alors,

6) les événements superposés à d'autres vont se mettre en mouvement et s'incrémenter dans des cadres blancs, afin de rester affichés en périphérie de leur localisation réelle. Cela laisse la place d'apparaître à de nouveaux symboles, qui seraient autrement superposés au premier.

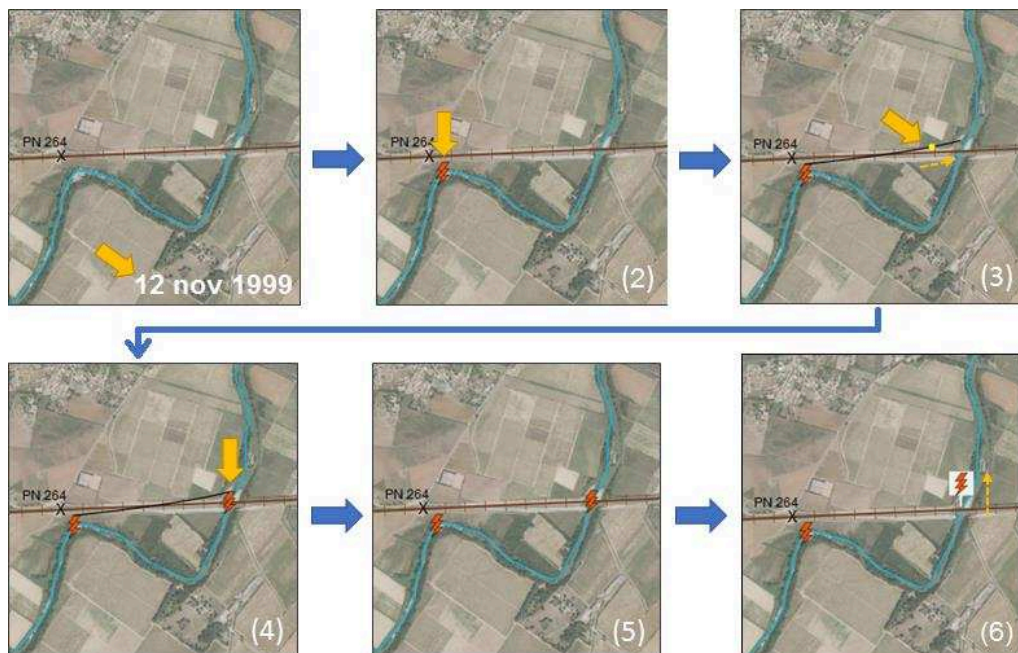


Figure 4.11. Déroulement d'une animation (cas d'un événement ayant une conséquence). NB : les flèches oranges surimposées à la carte indiquent les apparitions et les mouvements mais ne sont pas présentes dans l'animation finale.

Dans cette animation, tous les événements restent affichés dans l'emprise de la carte : il n'est donc pas nécessaire, pour l'utilisateur, de retenir les lieux où des événements antérieurs sont apparus. De plus, à l'étape finale de l'animation, tous les événements apparus au cours du temps sont affichés, ce qui permet de bénéficier d'une vue globale sur l'ensemble de la période. Ce procédé fait écho aux préconisations de représentations émises par Cheylan (2007) (cf. section V.3.1.1 et V.3.2.1) et aux bonnes pratiques que nous avons généralisées des géovisualisations animées récentes (section V.4.3.1).

Nous posons l'hypothèse que ce mode de représentation permet de pallier la limite de la surcharge de la mémoire de travail souvent imposée par les animations (cf. section V.2.2.2). Notons que le fait que les événements restent affichés jusqu'à la fin de l'animation facilite l'affichage des relations de causalités : la mémoire des événements passés est maintenue visuellement et les lignes de causalité peuvent être affichées malgré le cas où un événement cause et sa conséquence ont des dates très éloignées.

2.3. L'animation atemporelle comme vecteur de liaison entre localisations

La carte animée intègre à la fois une animation temporelle, montrant le déroulement du temps, et des animations atemporelles à l'intérieur de chaque scène d'animation. Les animations atemporelles utilisées sont de trois types :

- l'apparition par clignotement : le clignotement des symboles des événements qui apparaissent en début de scène, pour faciliter leur détection, grâce à la saillance de la variable « mouvement » (cf. section IV.2.1.4),
- la « délocalisation des symboles d'événements » : les événements se déplacent de leur localisation initiale sur la voie ferrée vers un cadre blanc, ce mouvement étant destiné à expliciter le lien entre leur localisation initiale et ce nouvel emplacement,
- le « soulignement des lignes de causalité » : des figurés jaunes parcourent les lignes de causalité pour montrer leur orientation, de l'événement cause vers son effet, ce qui peut aussi mettre l'accent sur la dispersion spatiale des conséquences d'un événement.

Les animations atemporelles sont donc utilisées soit pour augmenter la saillance des symboles, soit pour expliciter les relations entre plusieurs localisations. En ce sens, elles jouent un rôle de vecteurs de liaisons spatiales.

Le déplacement des événements vers les cadres blancs est également un moyen de faire la transition entre une scène de l'animation et la suivante. Il a été démontré que les transitions progressives entre scènes de l'animation diminuent l'effet de cécité au changement (Shipley et al., 2013). Ainsi, le déplacement animé des événements depuis leur localisation initiale prépare l'apparition de nouveaux événements lors des scènes suivantes.

2.4. Visualisation des temporalités

A la fin de l'animation, tous les événements survenus sur la période d'étude sont affichés dans la carte, fournissant une vue synthétique de leur répartition spatiale. La couleur attribuée aux événements renseigne sur leurs dates, mais avoir une vue chronologique globale de l'ensemble de la période est plus difficile, en particulier parce que les événements sont spatialement dispersés. Une vue temporelle globale peut favoriser l'exploration de données par les utilisateurs, selon le mantra de recherche visuelle : « donner une vue globale, zoomer et filtrer, puis détailler sur demande » (cf. section II.1.2.3).

Un graphique représentant une ligne de temps a donc été associé à la carte : il fournit une vue temporelle globale sur la période étudiée.

La ligne de temps est dessinée au pas de temps du jour, ce qui correspond à la granularité des dates contenues dans les archives historiques et retenues dans notre modèle. Les

événements sont distribués par dates sur un axe horizontal représentant le temps. L'axe vertical du graphique est employé pour montrer un attribut associé aux événements, par exemple leur type dans la Figure 4.12.

La ligne de temps reprend la symbologie des événements utilisée dans la carte : la forme du symbole pour représenter le type d'événement et la couleur pour la date. La correspondance des propriétés visuelles (couleur et forme) associées aux événements entre les deux vues nous semble permettre une meilleure mise en relation des informations figurant dans la ligne de temps avec celles figurant sur la carte.

Dans le processus de construction du graphique de ligne de temps, nous avons été confrontés à deux problèmes :

- Premièrement, les événements sont survenus sur de longues périodes de temps et sont concentrés en majorité dans les premières semaines de l'inondation, laissant de longues périodes vides dans le graphique. Pour composer avec ces espacements temporels, la solution adoptée a été de condenser graphiquement les périodes vides les plus longues, sous la forme d'un seul intervalle, auquel est attribuée une sémiologie différente qui contraste avec le reste de la ligne de temps : dans notre cas, un arrière-plan de couleur gris montre les sauts temporels. Les événements à moyen et long-terme survenus entre ces périodes vides, qui sont peu nombreux et eux-mêmes épars dans le temps, sont également groupés dans un même intervalle temporel.
- Deuxièmement, les événements qui sont survenus le même jour en début d'inondation apparaissent graphiquement superposés dans la ligne de temps. Pour pallier ce problème de superposition deux lignes de temps sont proposées : une régulière, où chaque jour occupe le même espace graphique, et une proportionnelle aux événements, dans laquelle la largeur d'une journée est proportionnelle au nombre d'événements survenus ce jour (Figure 4.12). Nous nommons ce procédé le « déploiement de la ligne de temps ».

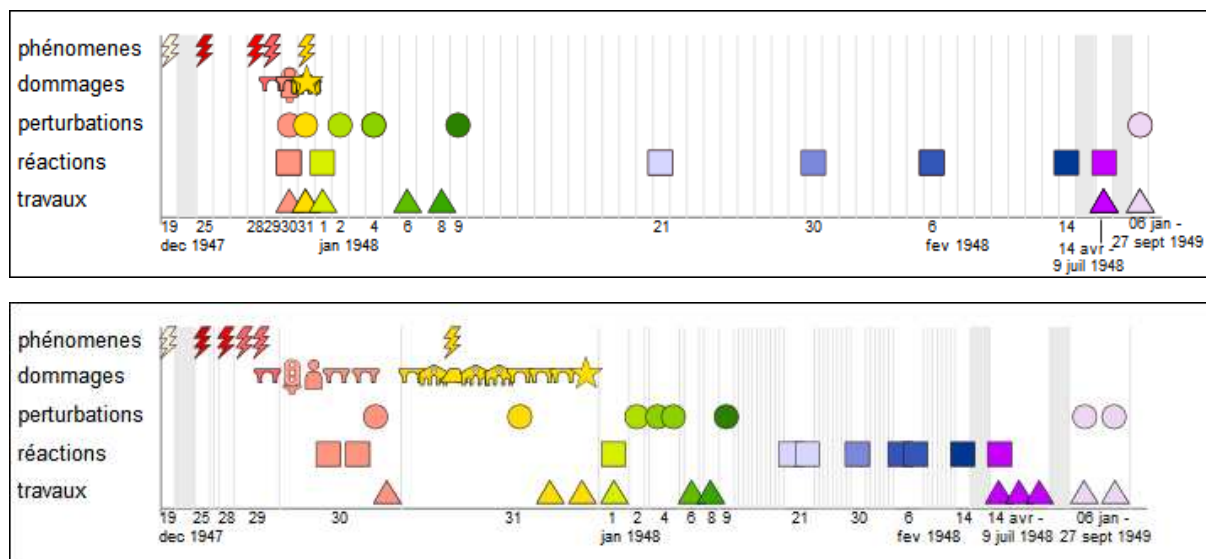


Figure 4.12. Lignes de temps montrant les événements survenus suite à l'inondation de 1947 à Metz. (Haut) Ligne de temps régulière – (Bas) Ligne de temps proportionnelle au nombre d'événements.

Les deux lignes de temps permettent de mettre en valeur des temporalités différentes, parmi les types de temporalités identifiés dans la littérature (cf. section V.1.3) (Dibiase et al., 1992; Hewitt, 1983; MacEachren et Taylor, 1994) :

- La ligne de temps régulière permet de visualiser la *date*, la *durée* et l'*espacement temporel* entre événements. L'association d'une dimension attributive en ordonnée nous semble également permettre indirectement de déduire des informations sur la *fréquence* des événements d'un même type.
- La ligne de temps proportionnelle aux événements permet de visualiser la *date*, le *taux de changement* (i.e. la quantité de modifications survenues dans l'espace par unité de temps) et l'*ordre* des événements (notamment l'ordre au sein d'une même journée).

En revanche, contrairement à ce que le lecteur pourrait penser intuitivement, elle ne met pas en évidence la synchronisation entre événements. En effet, les événements survenus un même jour sont classés dans un ordre logique d'apparition mais rien ne traduit la durée de ces événements, c'est-à-dire si plusieurs événements sont arrivés quasi-simultanément (dans un intervalle de quelques secondes) ou sont espacés de dizaines d'heures. La ligne de temps proportionnelle aux événements donne donc une vision ordinale de la date et non numérique. Ce fait devra être explicité aux utilisateurs avant tout usage de l'interface afin d'éviter de fausses interprétations.

2.5. Navigation à plusieurs échelles

A petite échelle, la carte proposée change d'aspect pour devenir une carte en cercles

proportionnels (Figure 4.9). Parallèlement, la ligne de temps prend l'apparence d'une ligne de temps synthétique, affichant uniquement le compte du nombre d'événements survenus chaque jour, sous la forme d'un histogramme (Figure 4.13).

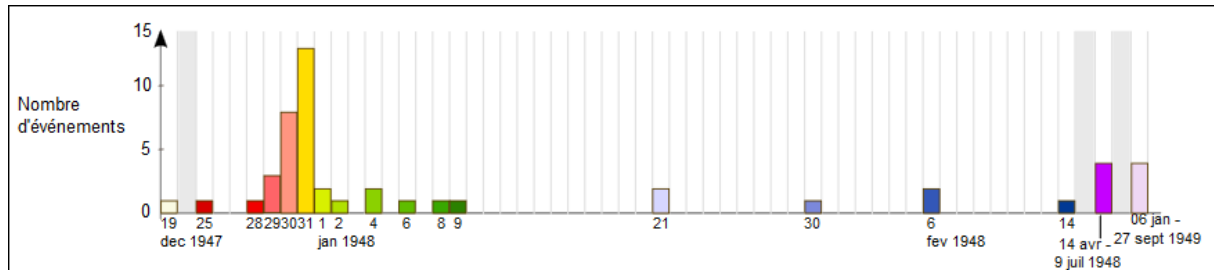


Figure 4.13. Ligne de temps dite « synthétique », proposant un résumé des événements à travers un histogramme du nombre d'événements survenus à chaque date – cas de l'inondation de 1947 à l'échelle de la ville de Metz.

Pour maintenir l'accès à la dimension narrative associée aux événements à cette échelle, le clic sur un cercle proportionnel affiche le nombre d'événements de chaque type dans la fenêtre descriptive et illumine toutes les dates concernées par ce cercle dans la ligne de temps par *brushing*. A l'inverse, le clic sur une date de la ligne de temps synthétique met en surbrillance tous les cercles proportionnels contenant un événement de cette date et affiche un court résumé des événements survenus ce jour-là sur l'ensemble de la zone, dans la fenêtre descriptive.

3. Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons émis des propositions sémiologiques et interactives afin d'explorer le récit d'une inondation majeure, à travers une interface de géovisualisation. La formalisation des propositions sémiologiques sous forme de règles pseudo-mathématiques constitue un cadre pour réutiliser notre méthode cartographique dans d'autres contextes, voire pour cartographier les récits d'autres risques naturels. Ces règles constituent également un premier pas vers l'automatisation de la cartographie d'événements spatio-temporels, à partir des récits instanciés dans l'ontologie IDISFER.

A l'échelle de l'interface de géovisualisation, trois contributions principales ont été formulées pour faciliter la visualisation d'informations spatio-temporelles nombreuses :

- Premièrement, le design en piles chronologiques d'événements, animées au cours du temps, permet de visualiser les événements superposés et de conserver une trace des scènes antérieures de l'animation, prolongeant ainsi la mémoire de travail de l'utilisateur. L'interactivité associée à la carte est essentielle pour que l'utilisateur puisse réinterroger les événements et les filtrer selon ses objectifs.
- Deuxièmement, la carte donne à voir explicitement les relations de causalité entre

événements, sous la forme de lignes qui lient les événements entre eux, afin de permettre aux utilisateurs d'explorer et d'analyser ces relations et leurs impacts sur le déroulement du processus d'endommagement des infrastructures.

- Troisièmement, la ligne de temps déployable fournit une vue globale de la répartition et de la dynamique des événements sur l'ensemble de la période étudiée. Ses trois formes : régulière, proportionnelle aux événements et synthétique, sont complémentaires et permettent au lecteur de lire des temporalités différentes associées aux événements.

Les utilisateurs peuvent adapter la visualisation à leurs objectifs, grâce aux outils interactifs de modification d'affichage et grâce à la synchronisation de différents modules de l'interface à travers le *linking and brushing* (cf. section II.1.2.3). Cette capacité d'adaptation de l'interface renforce l'utilité de la visualisation conformément à l'axiome de téléologie de la cindynique (cf. section II.2.1.2). Il a par ailleurs été démontré que la mise à disposition de l'interactivité peut également augmenter la charge cognitive germaine, permettant une meilleure mémorisation des informations (cf. IV.2.4.2). Enfin, la combinaison de l'animation et des vues temporelles avec la carte met en valeur les dynamiques et les temporalités associées aux événements, renforçant la dimension narrative de la visualisation.

L'application proposée a été implémentée dans un prototype web (Figure 4.10), développé en utilisant les langages HTML/CSS pour la mise en page, SVG/SMIL pour les vues graphiques et l'animation et Javascript pour l'interactivité. Les fichiers de données sont stockés dans des tableaux JSON. Une vidéo de présentation est téléchargeable sur internet⁵⁶.

Afin d'évaluer les propositions de représentation cartographique et de géovisualisation, l'application a été présentée à 22 experts du domaine ferroviaire au cours d'une expérimentation orientée utilisateurs. Les résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

⁵⁶ Lien vers la page de téléchargement : <http://membres-lig.imag.fr/saintmar/html/bonus.html>

VII/ Evaluation expérimentale des propositions de géovisualisation

Les propositions de géovisualisations émises dans le chapitre précédent ont été confrontées aux utilisateurs au cours d'une expérimentation. L'expérimentation avait pour premier objectif d'évaluer la validité des propositions auprès des utilisateurs pour lesquelles elles ont été conçues : l'interface de géovisualisation est-elle effectivement utilisable pour des utilisateurs experts du domaine thématique mais novices dans l'usage d'interfaces de géovisualisation ? La carte produite est-elle utile et utilisable pour ce public ? Les propositions sont-elles efficaces au regard des besoins des utilisateurs ? La question se pose notamment en ce qui concerne la représentation des relations de causalités entre événements, qui a fait l'objet de peu de travaux cartographiques et d'aucune étude utilisateur à notre connaissance.

Par ailleurs, les travaux de l'état de l'art concluent que l'usage de cartes animées ou non-animées ne permettent pas d'observer les mêmes informations sur un jeu de données (Fabrikant, Rebich-Hespanha, Andrienko, et al., 2008). Nous avons donc développé deux versions de la géovisualisation : une version interactive, non-animée, et une version interactive *et* animée (que nous appellerons *dynamique* dans la suite du texte), dans le but d'apporter des points de vue différents sur nos données. Comparer l'apport de chacun de ces modes de représentation a constitué le second objectif de l'expérimentation.

Ce chapitre présente tout d'abord les hypothèses expérimentales et le protocole mis en œuvre. Les résultats sont exposés, de pair avec les limites qu'ils révèlent dans le protocole. Les implications sur l'outil de géovisualisation de récit que nous proposons sont finalement discutées, en termes de bonnes pratiques et de limites de nos propositions.

1. Présentation de l'expérimentation

1.1. Objectifs et hypothèse

Le test de l'interface de géovisualisation par les utilisateurs avait deux objectifs principaux :

- déterminer si la méthode de visualisation des relations de causalités était compréhensible et utilisable pour des utilisateurs potentiellement novices en cartographie,
- déterminer si l'une des deux modalités de visualisation cartographique, carte interactive et carte dynamique, était plus efficace que l'autre pour lire les relations de causalités.

En nous basant sur la méthode majoritairement utilisée dans les visualisations cartographiques de récits intégrant des événements en relations (cf. section V.4.3.2), notre hypothèse de départ était que la carte dynamique serait plus efficace que la carte interactive pour lire les relations de causalités.

Cette hypothèse a été testée en faisant remplir des tâches par les participants. L'expérience a suivi un plan « *within-subject* » : chaque participant testait toutes les modalités de variables indépendantes. Comme nous l'avons décrit dans la section IV.3.1.2, ce plan d'expérimentation présente l'avantage d'augmenter le pouvoir statistique des analyses, menées sur un échantillon moins nombreux de participants, et de réduire l'erreur due aux différences entre individus. Il présente l'inconvénient que la confrontation à une modalité de la variable indépendante peut influencer les réponses à la suivante, mais ce facteur secondaire peut être contrôlé, comme cela sera décrit dans la suite du texte.

Deux variables indépendantes ont été testées, susceptibles d'influencer la performance de réponse :

- la modalité de carte utilisée : carte interactive ou dynamique,
- l'objectif des tâches à accomplir.

Les variables dépendantes qui ont été mesurées sont les indicateurs de performance de réponse communément utilisés en cartographie (cf. section IV.3.2.3) : l'exactitude des réponses et la durée de réponse.

Certaines caractéristiques individuelles des participants étant également susceptibles d'influencer les résultats (cf. section IV.3.2.4), nous avons relevé ces facteurs secondaires pour tenter de les contrôler : les caractéristiques démographiques des participants, leur familiarité avec les données (thématique « inondation », données historiques) et leur familiarité avec les technologies et outils manipulés (informatique, cartographie).

A ces variables contrôlées, nous avons combiné des mesures d'ordre qualitatif susceptibles d'expliquer les résultats observés (cf. section IV.3.3), à savoir l'observation en cours d'expérience et les traces d'utilisation, que nous détaillerons dans la section suivante.

Le dernier objectif consistait à évaluer nos propositions sémiologiques et de design d'interface. Un certain nombre de questions se posaient, notamment :

- La sémiologie proposée pour représenter la chronologie des événements est-elle compréhensible et utilisable par les experts thématiques ?
- Quelles fonctionnalités sont les plus utiles et les plus utilisées par les utilisateurs ?
- Quelles améliorations augmenteraient l'adaptation de la visualisation aux besoins des utilisateurs ?

Ces aspects qualitatifs ont également été testés au cours du protocole.

1.2. Protocole expérimental

1.2.1. *Participants*

Vingt-deux participants, experts du système ferroviaire, ont testé l'interface de géovisualisation au cours de sessions individuelles. Ce nombre peut paraître faible pour conduire des statistiques quantitatives représentatives. Cependant, nous avons pris garde, lors du recrutement du panel, que ce nombre soit suffisant pour conduire les analyses prévues dans notre protocole (décrites plus loin dans la section VII.1.3), en garantissant notamment un effectif minimal de 5 participants testant chaque combinaison de facteurs expérimentaux.

Ce nombre se situe par ailleurs dans la moyenne des études similaires en termes d'objectifs, c'est-à-dire visant à comparer deux à trois modalités de cartes et conduites auprès d'utilisateurs experts : par exemple 6 experts du domaine et 9 décideurs dans l'étude de Cliburn et al. (2002) sur l'évaluation de visualisation de données incertaines, 18 contrôleurs aériens dans l'étude de Maggi et al. (2016) sur l'animation et le suivi de déplacements d'avions et 25 agents des forces de secours et 13 décideurs dans l'étude de Palka (2015) sur les cartes de risques et d'évacuation.

Les participants ont été recrutés via un appel à volontaires à l'intérieur de la Direction de l'Ingénierie SNCF. Tous les répondants étaient donc a priori intéressés par la thématique des inondations ou de la gestion des risques liés à l'eau et participaient bénévolement, à côté de leur temps de travail.

1.2.2. *Logistique*

Les sessions expérimentales se sont déroulées dans les locaux de l'entreprise, sur une période de deux semaines en fonction des disponibilités des participants. Au cours de la session, les participants avaient à disposition un ordinateur pourvu de deux écrans : un écran placé sur la gauche, sur lequel les questions auxquelles répondre pour remplir les tâches s'affichaient, et un, placé sur la droite, sur lequel figurait l'application. Ainsi, les questions restaient affichées pendant la manipulation de l'interface.

Un observateur était présent durant la totalité du test, assis légèrement en retrait à la droite des participants. Il endossait plusieurs rôles au cours de l'expérience : celui de formateur, en expliquant l'objectif de l'étude et le fonctionnement de l'interface aux participants, puis en répondant à leurs interrogations ; celui d'apprenant, en adoptant une position de novice dans le domaine thématique d'étude et preneur de toute suggestion d'amélioration concernant la proposition d'interface ; celui d'interviewer, toutes les questions ouvertes du test étant posées à l'oral, sachant qu'elles peuvent être rébarbatives par écrit ; et enfin, celui de rapporteur, qui observait et prenait des notes sur le déroulement de la manipulation de l'outil par les participants et les éventuels problèmes rencontrés.

Le protocole a été testé, préalablement au test à grande échelle, auprès de deux experts du domaine ferroviaire connaissant le projet de thèse avant sa passation, afin de vérifier la durée de l'expérimentation et de s'assurer qu'il n'y avait pas d'erreurs majeures relatives au domaine thématique dans les questions posées.

1.2.3. Méthodologie

Le test durait 1h30 en totalité et comptait 4 phases. Leur déroulement est illustré dans la Figure 4.14 et détaillé ci-après.

Plan du protocole expérimental

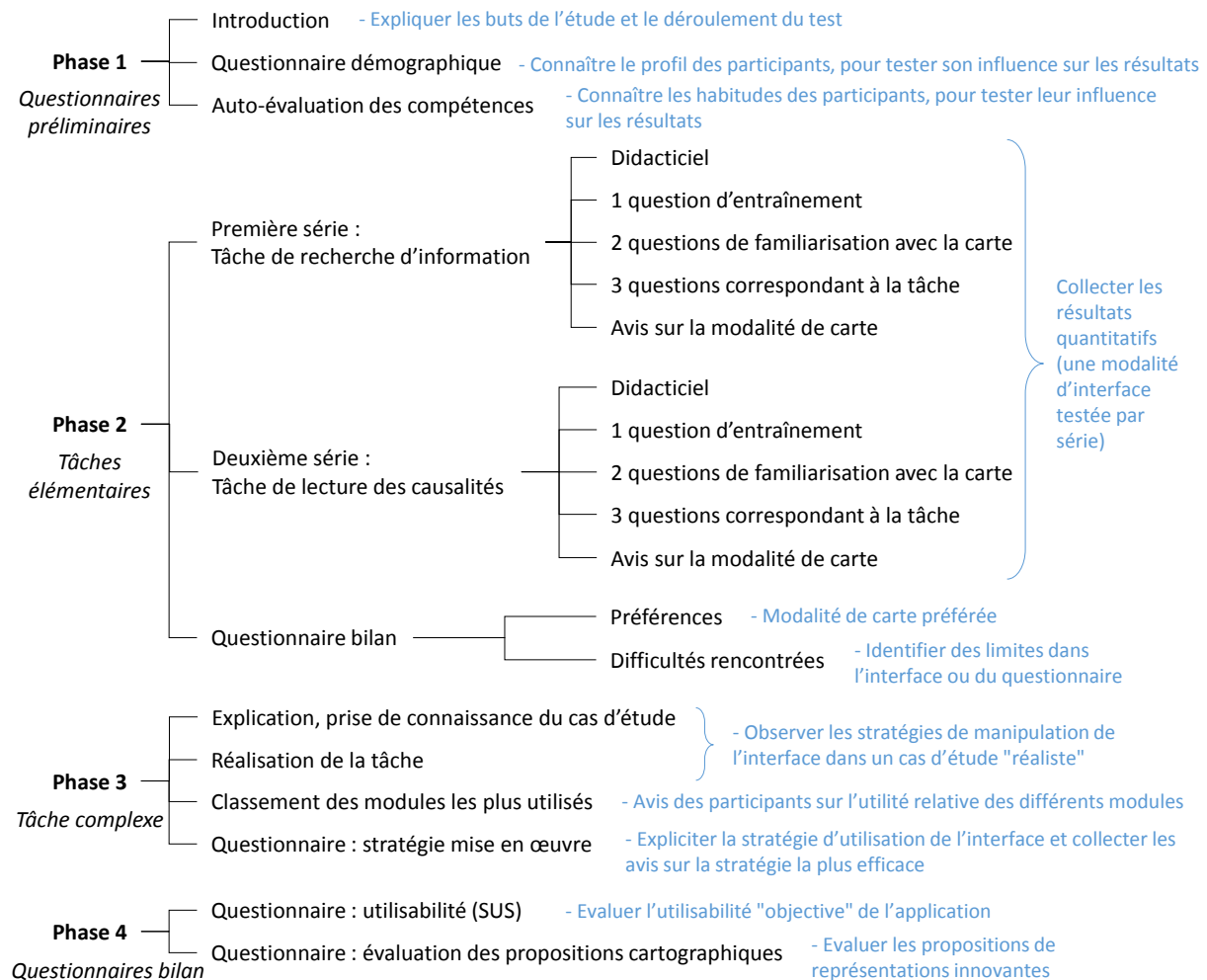


Figure 4.14. Résumé du protocole expérimental et des objectifs (en bleu) des différentes phases

Phase 1 : Présentation et questionnaire démographique

La première phase débutait par l'explication des objectifs de l'étude et du déroulement du test. Les participants devaient ensuite répondre à un questionnaire démographique qui les interrogeait sur leur âge, genre, domaine d'expertise et ancienneté dans l'entreprise. La

collecte de ces données permettait de savoir si notre échantillon était homogène dans ces catégories.

Un deuxième questionnaire permettait aux participants d'auto-évaluer la fréquence avec laquelle ils sont confrontés à différents thèmes dans leur métier :

- habitude de travailler sur le thème des inondations,
- habitude de manipuler des logiciels informatiques,
- habitude d'utiliser des cartes pour trouver des itinéraires d'une part ou pour prendre des décisions d'autre part,
- habitude d'utiliser des informations sur des événements récents ou anciens,
- habitude d'utiliser des informations issues d'archives papier ou de sources de données informatisées.

L'évaluation de fréquence était réalisée selon une échelle qualitative à quatre niveaux : « pas du tout », « occasionnellement », « régulièrement » et « très souvent ». L'échelle contenait des termes volontairement subjectifs (par rapport à « deux fois par mois » ou « tous les jours »), dans le but d'évaluer le sentiment d'habitude ou d'aisance des participants dans ces thèmes. L'aisance des participants a ensuite été corrélée avec les résultats obtenus.

Phase 2 : Réalisation de tâches élémentaires

Dans la deuxième phase, les participants devaient remplir deux séries de tâches, comportant chacune cinq questions, en utilisant les informations contenues dans l'interface de géovisualisation :

- La première série de tâches portait sur la possibilité de *retrouver une information d'intérêt* via l'interface. L'objectif était de comparer l'efficacité des modalités de carte interactive et dynamique pour une tâche courante, correspondant aux usages actuels des experts (comme rapporté dans la section I.3.4.1).
- La deuxième série portait sur la facilité de *lecture des relations de causalité entre les événements*. La représentation cartographique des causalités est l'une des principales innovations de notre carte (cf. section VI.3). Cependant, deux paramètres peuvent influencer l'efficacité de la lecture des causalités :
 - o La sémiologie utilisée pour représenter ces relations de causalités n'est peut-être pas compréhensible ou pas utilisable (l'expérimentation vise à valider ces propositions),
 - o les experts ne sont pas habitués à réaliser ce type de cette tâche.

La première série de questions permettait donc de tester la lisibilité de l'interface de géovisualisation en général, pour les deux modalités de cartes interactive et dynamique, tandis que la deuxième série de questions visait à tester la méthode de visualisation des relations de causalité, de nouveau selon les deux modalités de carte.

Chaque participant répondait à chaque série de questions avec une modalité de carte différente. L'ordre de présentation des deux modalités de carte a été alterné selon les

participants en suivant un plan carré latin, pour éviter l'apparition d'un effet d'apprentissage dans l'analyse des résultats.

Les séries de questions étaient en revanche présentées dans le même ordre pour tous les participants : d'abord la recherche d'informations puis la lecture des causalités. Conserver cet ordre avait pour but de permettre aux participants de s'approprier l'interface durant les questions de recherche d'information, plutôt communes, avant de traiter les tâches de lecture des causalités, plus atypiques.

Une interface de géovisualisation peut être un outil relativement complexe à manier pour des utilisateurs novices en cartes interactives. Par conséquent, un didacticiel présentant les fonctionnalités de chaque modalité de carte a été inséré préalablement à chaque série de questions.

La série de questions débutait par une première question d'entraînement, dont le résultat s'affichait immédiatement après la réponse du participant et était discuté avec l'interviewer. Cette question d'entraînement servait à la fois à se familiariser avec l'interface et avec le fonctionnement du questionnaire. Ensuite, deux questions dites « de familiarisation » ouvraient la série de questions. Ces questions n'avaient pas vocation à être analysées dans les résultats, mais visaient plutôt à encourager le participant à explorer l'interface avant que ses performances soient mesurées. Suivaient ensuite les trois « véritables » questions correspondant au type de tâche de la série.

Une des caractéristiques majeure des interfaces de géovisualisation est de combiner plusieurs vues sur les données : vues spatiales (carte), temporelles (graphiques) et thématiques (fenêtre textuelle et sémiologie) (Davoine et al., 2009). Nous avons donc élaborées des questions portant sur la dimension spatiale (où ?), la dimension temporelle (quand ?) ou ces deux dimensions à la fois. Certaines questions de familiarisation portaient également sur la sémiologie pour encourager les participants à explorer la légende des symboles.

Les questions posées aux participants sont listées dans le Tableau 4.1. Les questions de familiarisation précédaient toujours les vraies questions, mais l'ordre des questions d'une même catégorie a été interverti par tirage aléatoire selon les participants, pour éviter que l'ordre n'influence les résultats.

Tableau 4.1. Liste des questions posées lors du test et dimensions de l'information interrogées

Type de question	Code	Question	Dimension interrogée
Familiarisation	TF1	Quelle date correspond à la couleur orange dans la légende ?	Sémiologie
Familiarisation	TF4	Quel est le symbole d'un incident affectant un remblai ?	Sémiologie
Familiarisation	TF5	A quelle date le premier événement de travaux apparaît-il ?	Temps
Familiarisation	TF3	A quel pk [point kilométrique] est survenu l'événement du	Espace x Temps

21 novembre ?			
Recherche d'information	T2	Le passage à niveau 264 a-t-il été submergé par le débordement du cours d'eau ?	Espace
Recherche d'information	T1	Combien d'événements du type travaux sont survenus le 14 novembre ?	Temps
Recherche d'information	T3	A quelle date les enrochements du viaduc de l'Orbieu ont-ils été emportés ?	Espace x Temps
Lecture des causalités	T5	Quelle est la conséquence de l'événement qui est survenu au pk 391.760 ?	Espace
Lecture des causalités	T8	Quelle est la date de fin de la pose des nouveaux poteaux caténaux ?	Temps
Lecture des causalités	T7	Combien de causes et conséquences directes sont liées à l'événement du 16 novembre situé sur le viaduc de l'Orbieu ?	Espace x Temps

Pour chaque question, l'exactitude de la réponse et le temps de réponse étaient mesurés. Sachant que les cartes animées et non animées ne sont pas computationnellement équivalentes (Fabrikant, Rebich-Hespanha, Andrienko, et al., 2008), d'autres mesures plus qualitatives ont été utilisées pour capter l'influence du changement de modalités de carte sur le comportement des utilisateurs :

- l'observation en temps réel des actions des participants par l'interviewer/observateur,
- l'enregistrement des traces d'utilisation (i.e. la séquence de clics réalisés dans l'interface).

A partir des traces d'utilisation, nous avons aussi analysé deux mesures quantitatives supplémentaires, susceptibles d'apporter plus d'information sur l'efficacité relative des modalités de cartes interactive et dynamique :

- la durée avant le premier clic, dont nous posons l'hypothèse qu'elle peut signaler une difficulté à comprendre la question ou une hésitation avant d'utiliser l'interface pour répondre, et
- l'écart entre le nombre de clics réalisés par le participant pour répondre et un nombre de clics optimal défini au préalable par le cartographe. Le nombre de clics étant nécessairement plus élevé pour la carte animée, qui comprend notamment des boutons supplémentaires de contrôle de l'animation, l'analyse de cet écart au nombre de clics optimal permet de gommer en partie les différences dues à cette variation de modalités de carte.

A la fin de chaque série de questions, un questionnaire demandait aux participants d'évaluer

la carte qu'ils venaient de manipuler : est-elle facile à comprendre, est-elle facile à utiliser, quel est leur degré de confiance dans leurs réponses et quels sont les éléments qu'ils apprécient ou, à l'inverse, qu'il faudrait améliorer dans l'interface.

Il a également été demandé aux participants si, à leur avis, leur temps de réponse reflétait la complexité des questions posées. Cette question visait à identifier si les participants jugeaient que leur temps de réponse constituait un indicateur d'efficacité (si réponse positive) ou non (si réponse négative).

Suite aux deux séries de questions, un questionnaire bilan permettait aux participants de s'exprimer sur la modalité de carte qu'ils avaient préférée et sur les éventuels problèmes rencontrés pendant le test. L'ensemble des questionnaires remplis durant le test est consultable dans l'Annexe 4.

Phase 3 : Réalisation d'une tâche complexe

Les tâches élémentaires de la Phase 2 permettent de fractionner l'acte de lecture de la carte et d'analyser les réponses quantitativement, en relation avec des contextes connus et maîtrisés. Mais elles ne sont pas représentatives de la façon dont les utilisateurs explorent l'interface dans un cas d'utilisation réel. Lors d'une utilisation réelle, les participants ont bien un objectif global mais fixent leurs propres objectifs intermédiaires pour y parvenir, selon une séquence qui correspond à leur mode de raisonnement. Les modules de l'interface utilisés peuvent différer de ceux guidés par les tâches élémentaires. Pour observer ces comportements « réels », nous avons donc conçu une tâche dite « complexe ».

La tâche complexe consistait en une mise en situation vraisemblable par rapport au contexte métier du système ferroviaire. Elle a été inspirée d'une tâche réelle à laquelle notre public principal pouvait être confronté : la rédaction de l'historique des dommages subis par un ouvrage, qui est parfois réalisé pour les comparer avec les dégâts récents survenus pendant un événement de risques naturels. La Figure 4.15 montre l'énoncé de mise en situation.

« Météo France a annoncé une alerte pluies et inondations pour la nuit du 15 décembre 2018 dans le département de la Moselle. La ligne 180000 de Metz-Ville à Zoufftgen (Luxembourg) est actuellement stratégique car elle est classifiée "Corridor européen de transport". Pour savoir si elle peut être impactée par cette inondation imminente, on vous demande de produire un bref historique des incidents liés aux inondations passées sur la ligne. Vous savez que l'inondation de décembre 1947 a justement causé des dommages au niveau de la ville de Metz, où la ligne passe.

Grâce aux informations communiquées dans la carte interactive, décrivez succinctement comment les incidents de 1947 sont survenus sur la ligne 180000, quelle a été la nature de ces incidents et comment la ligne a été remise en état, jusqu'au retour à la normale des circulations. »

Figure 4.15. Énoncé de la tâche complexe

Les participants disposaient de 15 minutes pour remplir cette tâche, à l'aide de la modalité de carte qu'ils avaient préférée suite aux tâches élémentaires. Pour guider leur réponse, 4 champs de texte libre, vierges, étaient proposés sur la page du questionnaire, correspondant chacun à l'une des informations demandées dans l'énoncé. Ils étaient intitulés, dans cette ordre : « chronologie des phénomènes naturels », « nature et localisation des incidents », « travaux et mesures de réaction » et « régulation des circulations ».

Grâce aux pré-tests par deux experts du domaine, nous avons identifié que 15 minutes était une durée trop courte pour collecter et renseigner l'ensemble de ces informations. Cependant, la durée totale de l'expérimentation étant déjà longue, nous avons fait le choix de conserver ce temps limité. Les participants ont donc été informés de vive voix que l'objectif n'était pas qu'ils répondent exhaustivement aux informations demandées, mais plutôt de voir quelle serait leur méthode d'exploration de l'interface.

Durant cette phase, le texte de réponse des participants, le temps de réponse et la trace d'utilisation ont été collectés pour analyse. L'observateur prenait également des notes sur la méthode d'exploration des événements mise en place par le participant.

Suite à leurs réponses, on demandait aux participants de classer les modules de l'interface dans l'ordre du plus utilisé au moins utilisé, pour avoir leur avis sur les modules clés de l'interface et les comparer avec les traces d'utilisation. En complément, l'interviewer leur demandait à l'oral de faire un retour sur leur stratégie d'exploration :

- « Comment avez-vous procédé pour retrouver les informations qui vous étaient demandées ? Quelle a été votre stratégie ? » Cette question visait à expliciter la stratégie d'exploration mise en œuvre par les participants, pour compléter l'observation.
- « Si vous aviez à refaire l'exercice, utiliseriez-vous la même stratégie ? » Cette question visait à identifier si les participants étaient satisfaits de la démarche adoptée et s'ils la jugeaient efficace.

En raison de la durée relativement longue de l'expérimentation, douze participants, sur vingt-deux au total, n'ont pas participé à cette 3^{ème} phase qui durait 30 minutes. Cela ne porte pas préjudice à l'analyse des résultats de cette phase, essentiellement qualitative. Les participants concernés sont passés directement à la 4^{ème} et dernière phase.

Phase 4 : Opinion sur l'application

La dernière phase visait à collecter l'opinion des participants sur l'application de géovisualisation.

L'utilisabilité globale de l'application a été évaluée en dix questions grâce au questionnaire SUS (System Usability Scale) (Brooke, 1986). Cette échelle d'évaluation en 10 questions

permet d'évaluer le niveau général d'utilisabilité d'un système informatique. Elle a pour avantage d'être clé en main et de fournir en résultat une note sur 100, permettant de comparer objectivement l'opinion des participants ou bien la facilité d'utilisation entre plusieurs systèmes informatiques.

Un dernier questionnaire demandait aux participants d'exprimer leur accord avec des affirmations concernant les propositions cartographiques innovantes, sur une échelle à cinq niveaux (de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord »), par exemple : « l'affichage des symboles de façon empilée, pour montrer leur ordre, est compréhensible » ou « les lignes de causes et conséquences entre événements sont faciles à lire ».

Ces deux questionnaires sont rapportés dans l'Annexe 4.

1.2.4. Originalités du protocole

Le protocole expérimental que nous déployons présente deux originalités par rapport aux protocoles habituellement utilisés en cartographie.

Premièrement, le test porte sur l'intégralité de l'interface et notamment sur les relations entre l'usage de la carte et de la ligne de temps, alors que les expérimentations testent habituellement un composant unitaire de la représentation cartographique (ex: Griffin et al., 2006; MacEachren et al., 2012; Mandran et al., 2013) ou bien une fonction d'interaction (ex: Peterson, 1999; Ooms et De Maeyer, 2015). Cette habitude provient de la psychologie expérimentale, qui restreint le seul paramètre variant au facteur testé. Cependant, en cartographie, cette approche n'est plus judicieuse dès lors que l'on souhaite tester des environnements plus complexes, composés de plusieurs modules aux apports complémentaires pour l'analyse des données.

Entre les deux modalités d'interface que nous testons, les seules variations proviennent de l'introduction de l'animation :

- apparition animée des événements dans la carte, au lieu qu'ils soient tous visualisés dès l'ouverture,
- affichage animé des relations de causalités entre événements, au lieu de les afficher sur demande interactive,
- animation d'un curseur temporel parcourant la ligne de temps et
- ajout de boutons de contrôles interactifs de l'animation dans l'interface.

Si les résultats d'efficacité divergent entre la carte interactive et la carte dynamique, nous ne serons peut-être pas en mesure de savoir duquel des composants listés ci-dessus est issue cette différence. En étant conscient de cette limite, l'analyse de l'ensemble de l'interface nous permet d'étudier les comportements de navigation et d'interrogation des utilisateurs dans une interface multi-composante, ce qui a fait l'objet de peu d'études en cartographie (Golebiowska et al., 2017).

La deuxième originalité vient de la considération des traces d'utilisations (en anglais *interaction logs*) pour analyser les comportements des utilisateurs dans l'application, ce qui est peu répandu en cartographie (cf. section IV.3.2.3). L'analyse des traces d'utilisation nous permettra donc d'explorer les apports potentiels de cette technique dans l'évaluation d'une interface cartographique.

1.3. Méthode d'analyse des résultats

L'ensemble des résultats a été analysé à l'aide de méthodes quantitatives et qualitatives. Les réponses aux tâches élémentaires et aux différents questionnaires d'évaluation ont fait l'objet de statistiques univariées. Des statistiques bivariées ont été réalisées pour tester nos hypothèses et la généralisation des résultats au-delà de notre échantillon de participants. Les tests du Khi-deux, de l'ANOVA et de régression/corrélation linéaire, avec un risque d'erreur α fixé à 0.05, ont permis d'évaluer les relations entre les résultats aux questions et les variables indépendantes : caractéristiques démographiques des participants, habitudes de travail, modalité de carte utilisée, type de tâche et dimension interrogée dans les questions.

Les traces d'utilisation ont été analysées de façon quantitative dans un tableur et aussi qualitativement à l'aide des logiciels Undertracks et UT-Orange (Bouhineau et al., 2013).

La première série d'analyses menée a révélé que certains résultats ne correspondaient pas complètement aux variables indépendantes testées. En cherchant à les expliquer, nous avons découvert que la construction de notre expérimentation présentait des limites. Explicitées dans la section ci-après, elles ont donné lieu à la conduite d'analyses complémentaires.

1.4. Limites de l'expérimentation identifiées a posteriori

Lors de l'analyse des résultats, nous avons été confrontés à deux découvertes, qui remettent en cause certains aspects du protocole expérimental.

Premièrement, il s'est avéré que la réponse à deux questions posées parmi dix ne se trouvait pas explicitement dans les données cartographiées. Il s'agissait des questions T2 (interrogeant l'espace) et T8 (interrogeant le temps). Les énoncés contenaient des ambiguïtés, pouvant être interprétées par les experts de plusieurs façons. Cette imprécision des énoncés n'avait pas été détectée par les testeurs experts lors des pré-tests de validation du protocole. C'est l'observation directe des participants au cours du test qui a permis de la remarquer. Les questions imprécises ont été ôtées de l'analyse des résultats et ont été traitées à part. Leur analyse permet cependant d'observer la manière dont les participants réagissent lorsqu'une donnée recherchée est manquante.

Suite au retrait de ces deux questions imprécises, l'effectif total de questions était insuffisant pour réaliser les analyses quantitatives initialement prévues. Les tâches de familiarisation ont donc finalement été intégrées à l'échantillon de questions analysées, sauf pour l'analyse de

l'effet de l'objectif des tâches (i.e. tâches de recherche d'information ou de lecture des causalités).

Deuxièmement, nous avons découvert que la dimension de l'information interrogée dans la question n'était pas le seul facteur influençant les réponses aux tâches élémentaires. A dimension équivalente, on observe une grande variabilité entre le taux de bonnes réponses aux questions, comme l'illustre la Figure 4.16. La question T7 a notamment un taux de bonnes réponses moins élevé que toutes les autres, ce qui nécessite d'être expliqué.

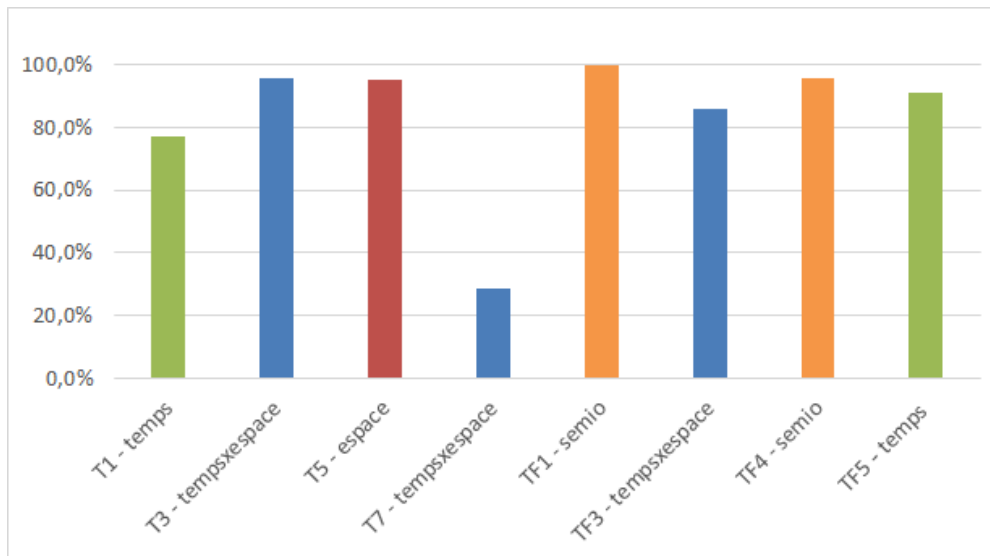


Figure 4.16. Taux de bonnes réponses par dimension interrogée dans la question

Nous avons découvert que ces différences étaient liées à la complexité cognitive des questions posées (Anderson et Krathwohl, 2001). Dans le domaine des sciences de l'éducation, Anderson et Krathwohl ont proposé six types de processus cognitifs mis en œuvre dans la réalisation d'exercices, qui requièrent des efforts croissants : *mémorisation*, *compréhension*, *application*, *analyse*, *évaluation* et *création* (Tableau 4.2). Ces travaux ont été découverts après la passation de notre test utilisateurs, ils ont donc été analysés a posteriori. Ils ont révélé que les tâches élémentaires avaient des niveaux de complexité hétérogènes (cf. Tableau 4.3).

Tableau 4.2. Taxonomie de la complexité cognitive des questions (traduit de l'anglais à partir de Anderson et Krathwohl, 2001; cités par Wu et al., 2012)

Dimension	Définition
Mémorisation	Retrouver, reconnaître et se remémorer les connaissances pertinentes à partir de la mémoire à long-terme.
Compréhension	Construire du sens à partir de messages oraux, écrits ou graphiques, en interprétant, exemplifiant, classifiant, résumant, inférant, comparant et expliquant.
Application	Conduire ou utiliser une procédure en exécutant ou implémentant.
Analyse	Découper le matériel en parties constituantes, déterminer comment les parties sont reliées les unes aux autres et avec une structure ou un objectif global, en différenciant, organisant et attribuant.
Evaluation	Emettre des jugements basés sur des critères et des standards en vérifiant et critiquant.
Création	Rassembler des éléments pour former un tout cohérent et fonctionnel ; réorganiser les éléments en un nouveau motif ou une nouvelle structure, en générant, planifiant ou produisant.

Tableau 4.3. Complexité cognitive des questions dans notre expérimentation (les questions imprécises ont été exclues des analyses)

Tâches	Complexité	Dimensions
T1	compréhension	temps
T2	mémorisation	espace
T3	compréhension	temps x espace
T5	compréhension	espace
T7	analyse	temps x espace
T8	compréhension	temps
TF1	mémorisation	sémiologie
TF3	compréhension	temps x espace
TF4	mémorisation	sémiologie
TF5	compréhension	temps

A titre illustratif, la compréhension de la question T7 (« Combien de causes et conséquences directes sont liées à l'événement du 16 novembre situé sur le viaduc de l'Orbieu ? ») nécessitait, pour le participant :

- de segmenter l'énoncé en plusieurs parties significatives : « combien de causes », « combien de conséquences », « directes », « sont liées à l'événement du 16 novembre », « situé sur le viaduc de l'Orbieu »,
- d'identifier les relations entre ces parties,
- de reconstituer l'objectif global de la question en les organisant.

A ce titre, la question T7 a un niveau de complexité « analyse ».

L'influence de la complexité cognitive des questions a été testée statistiquement au cours de l'analyse des résultats.

2. Résultats

2.1. Profil des participants

2.1.1. Caractéristiques individuelles

L'expérimentation a été menée auprès de 22 participants travaillant à la Direction de

l'Ingénierie de SNCF Réseau. Les informations démographiques collectées permettent de dresser leur profil. Les participants travaillent majoritairement soit en hydrologie et hydraulique (43% des participants), soit en géologie et géotechnique (24%), dont 14% des participants travaillant dans ces deux disciplines à la fois.

Le public ayant participé au test de l'application de géovisualisation n'est donc pas restreint aux seuls hydrologues et hydrauliciens, identifiés comme notre public cible à l'issue du chapitre I. Cela ne pose pas de problèmes pour la validité des résultats et nous permet d'évaluer nos propositions dans un contexte ferroviaire plus large. Cela nous permettra également d'étudier si ce public, visé préférentiellement lors du développement de l'application, a des résultats différents des autres.

Chaque tranche d'âge est représentée (Figure 4.17). L'échantillon compte 41% de femmes et 59% d'hommes. Enfin, la majorité des participants (73%) travaille depuis 5 ans ou plus dans l'entreprise. Ils possèdent donc en majorité une connaissance étendue du système ferroviaire et peuvent, à ce titre, être considérés comme « experts du système ferroviaire ».

L'échantillon s'étend donc légèrement au-delà du public cible en termes de champs disciplinaires.

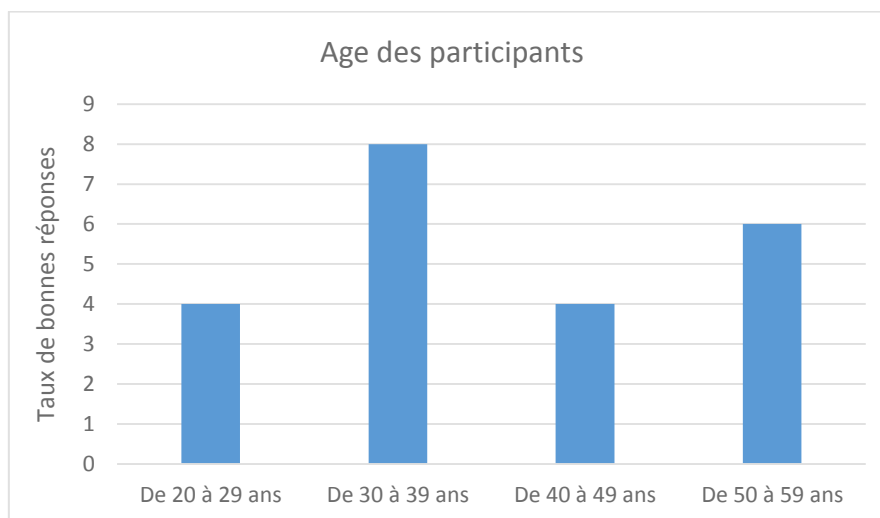


Figure 4.17. Tranches d'âge des participants

2.1.2. Habitudes thématiques et techniques

Concernant les habitudes de travail des participants, 68% disent travailler régulièrement à très souvent sur le thème des inondations. Tous les participants ont recours à des données sur des événements passés dans leur travail. Ils rapportent qu'ils utilisent en moyenne plus souvent des informations sur des événements récents, c'est-à-dire postérieurs à 1990 (81% en utilisent régulièrement à très souvent), que sur des événements anciens (55% en utilisent régulièrement à très souvent). Concernant le format de récupération de ces données, une

majorité de participants disent utiliser régulièrement ou très souvent des données anciennes provenant de sources de données informatisées (77%), tandis que la fréquence est plus faible pour ceux qui disent utiliser des archives papier régulièrement à très souvent (55%). Les participants qui ont l'habitude d'utiliser souvent l'un de ces deux formats de données ont également tendance à utiliser souvent l'autre.

55% des participants estiment utiliser régulièrement des logiciels métier spécialisés et 23% très souvent. Ils sont donc en majorité habitués à utiliser des logiciels informatiques.

Une majorité de participants pensent utiliser des cartes pour trouver des itinéraires très souvent (68%), que ce soit dans leur métier ou dans leur vie personnelle, 27% en utiliser régulièrement et seulement 5% occasionnellement (Figure 4.18). Leur impression est qu'ils utilisent en moyenne moins souvent des cartes pour prendre des décisions. 45% pensent en utiliser très souvent, 27% régulièrement et 27% disent n'utiliser des cartes pour prendre des décisions que occasionnellement ou jamais (Figure 4.19).

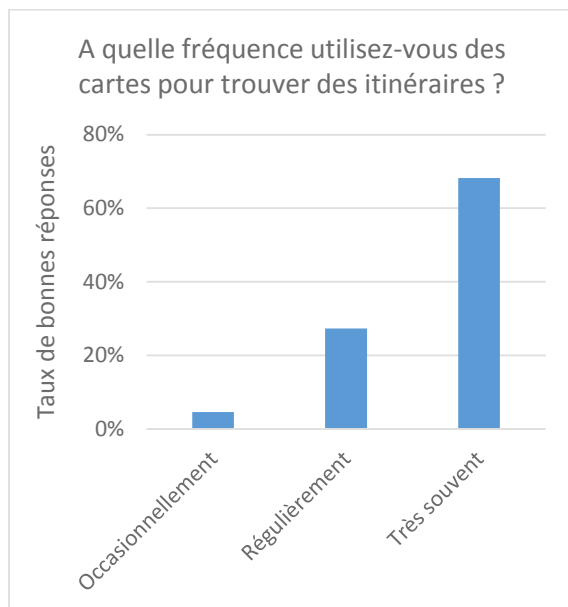


Figure 4.18. Habitude ressentie d'utiliser des cartes pour trouver des itinéraires

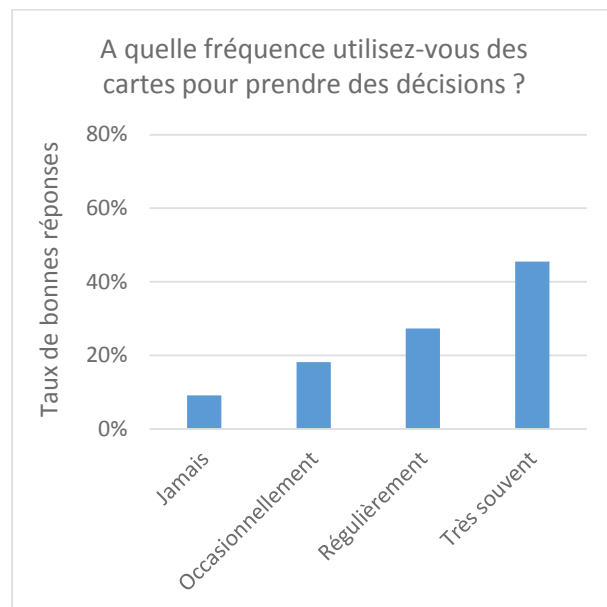


Figure 4.19. Habitude ressentie d'utiliser des cartes pour prendre des décisions

Deux-tiers des participants sont familiers du thème des inondations. Ils sont donc a priori intéressés par les informations présentées par l'application de géovisualisation.

Les participants sont en majorités habitués à l'informatique, à l'usage de cartes et aux sources de données informatisées. Sur la base de ces paramètres, on peut supposer qu'ils ont en majorité les compétences requises pour avoir pu s'appropriier l'outil de géovisualisation au cours de l'expérimentation.

2.2. Efficacité dans les tâches élémentaires

2.2.1. Interactions entre les mesures quantitatives

Quatre types de mesures ont été réalisées sur les données : taux de bonnes réponses, durée de réponse, durée avant le premier clic et écart au nombre de clics optimal. Ces mesures ne sont pas totalement indépendantes les unes des autres.

La durée de réponse augmente légèrement mais significativement lorsque la réponse émise est fautive (intensité très faible : 4,7%). La durée de réponse est significativement corrélée à l'écart au nombre de clics optimal (intensité de la relation moyenne : 32%). Par voie de conséquence, on observe aussi que les réponses fautes ont en moyenne un écart au nombre de clics optimal plus élevé (relation significative mais d'intensité très faible : 7%).

La durée avant le 1^{er} clic est un indicateur assez indépendant des autres. Elle n'est corrélée qu'avec la durée totale de réponse, ce qui reflète le fait qu'elle est incluse dans la durée totale. Cette relation n'est cependant pas évidente car la durée avant le premier clic aurait pu être constante ou aurait pu permettre de répondre plus vite par exemple. L'intensité de cette relation est très faible (4%).

Le fait que ces mesures ne soient pas indépendantes signifie qu'il y a une légère redondance dans les analyses qui seront déduites de chacune. Mais ces relations restent d'intensité assez faible.

Il semble donc que l'analyse de chacune de ces quatre mesures puisse apporter des éléments indépendants et d'intérêt dans la suite de l'analyse. L'écart au nombre de clics optimal étant cependant assez lié à la durée totale de réponse, il est probable que les résultats de ces deux mesures soient les mêmes, ce à quoi nous allons prêter attention dans la suite de l'analyse.

2.2.2. Différence entre tâches de recherche d'information et de lecture des causalités

Dans la première série de questions sur la recherche d'informations, une grande majorité des participants a réussi à retrouver l'information demandée à travers l'interface de géovisualisation (86% de réponses correctes aux questions). Cette statistique est légèrement plus élevée avec la carte interactive (91%) qu'avec la carte dynamique (82%) mais la différence entre ces deux modalités de carte n'est pas statistiquement significative. La durée moyenne de réponse à cette série est plus élevée avec la carte dynamique (82,8s) qu'avec la carte interactive (75,6s) mais cette différence n'est pas non plus significative statistiquement.

Lorsqu'on demande aux participants de citer trois points positifs et trois points négatifs relatifs aux deux modalités de carte, ceux-ci sont un peu divisés sur la facilité d'accès à l'information. 23% trouvent qu'il est simple de trouver une information (4 voix exprimées avec la carte interactive et 1 voix avec la carte dynamique) et, à l'opposé, 14% (3 participants) rapportent avoir eu des difficultés à localiser une information d'intérêt. Cela

semble dû à la grande densité d'informations présente dans l'interface. En effet, 2 participants parmi ces 3 derniers suggèrent d'implanter un champ de recherche par mot-clé pour localiser rapidement les événements susceptibles de contenir une donnée recherchée.

Les deux modalités de cartes proposées permettent donc bien de retrouver des informations d'intérêt, bien que certains participants critiquent la grande densité d'informations. La carte interactive est légèrement plus efficace que la carte dynamique pour cette tâche, mais les résultats ne sont pas statistiquement généralisables au-delà de notre échantillon de participants.

Dans la deuxième série de questions, la majorité des participants ont réussi à lire les lignes de causes et conséquences entre événements (62% de réponses correctes aux questions). Les résultats sont meilleurs avec la carte interactive, où les lignes de causalités sont colorées et affichées sur demande (70% de réponses correctes), qu'avec la carte dynamique où les lignes apparaissent pendant l'animation (55% de réponses correctes), mais cette différence n'est pas significative. La différence de temps de réponse n'est pas statistiquement significative non plus, bien que la carte interactive permette de répondre plus vite que la carte dynamique ici aussi (87,4s contre 120,4s).

68% des participants pensent que les lignes de causalités sont plutôt ou tout à fait faciles à lire. En revanche, les avis sont mitigés sur l'apparence donnée à ces relations de causalité. Deux participants soutiennent que les lignes de causalité sont plus faciles à lire dans la carte interactive que dans la carte dynamique. D'autres trouvent que lorsque les lignes de causalités sont nombreuses dans la carte interactive, elles peuvent gêner la lecture et l'interaction avec les symboles d'événements.

Des améliorations de l'apparence de ces lignes ont été proposées : dans la carte interactive, mettre des flèches de direction sur les liens causes et conséquences plutôt que des couleurs ; dans la carte dynamique, afficher les lignes de causalité non seulement lors de l'animation mais aussi sur demande, lors du clic. Les participants qui remettent en cause l'esthétique des lignes de causalité sont, plus souvent que la moyenne, ceux qui travaillent souvent sur les inondations et qui utilisent souvent des cartes. Leur plus grande expertise dans la thématique et vis-à-vis de l'outil testé favorise peut-être leur esprit critique vis-à-vis des propositions. L'avis de ces participants en particulier peut donc être intéressant à dissocier de l'avis des participants plus novices dans la phase 4 d'évaluation des propositions de représentations innovantes.

Les participants parviennent en majorité à lire les relations de causalité entre événements, quelle que soit la modalité de carte. La carte interactive est légèrement plus efficace que la carte animée pour cette tâche, mais ce résultat n'est pas généralisable en dehors de notre échantillon de participants.

Si l'on compare les deux séries de questions, le taux de bonnes réponses est donc plus élevé

et la durée de réponse plus faible pour les tâches de recherche d'information que pour les tâches de lecture de causalité (Figure 4.20 et Figure 4.21). La différence de taux de bonnes réponses est statistiquement significative (intensité de la relation moyenne : 28% selon le V de Cramer). La différence de durée de réponse n'est pas significative, bien qu'elle soit en moyenne plus longue pour les questions de causalité (104s contre 79s). Les deux autres variables analysées, l'écart au nombre de clics optimal et la durée avant le premier clic, suivent la même tendance : écart au nombre de clics optimal plus élevé (18 clics contre 11) et durée avant le premier clic *significativement* plus élevée (16s contre 11,5s) pour les tâches de lecture des causalités.

Pour les tâches de recherche d'information, le nombre de participants ayant réalisé un nombre de clics proche du nombre optimal est équivalent avec les deux modalités de carte. En revanche, pour les tâches de lecture des causalités, la carte interactive donne un nombre de clics plus souvent proche du nombre optimal de clics (2 à 5 participants proches du nombre optimal pour chaque tâche) par rapport à la carte dynamique, sauf pour la question imprécise (i.e. pour laquelle la réponse n'est pas disponible dans l'application) où les résultats sont équivalents entre les deux modalités de carte.

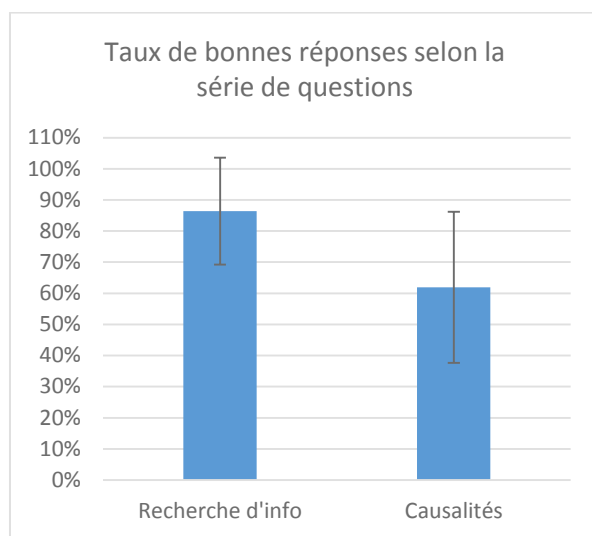


Figure 4.20. Taux de bonnes réponses selon l'objectif des questions, tous types d'interfaces confondus

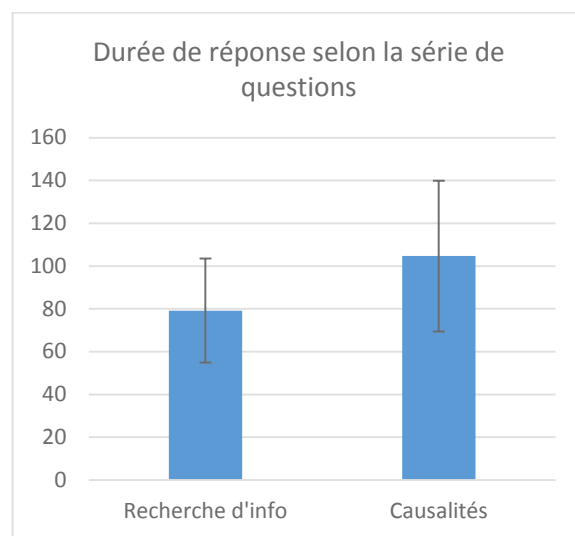


Figure 4.21. Temps de réponse moyens (en secondes) selon l'objectif des questions, tous types d'interfaces confondus

Interrogés à la fin des deux séries de questions, tous les participants (100%) sont plutôt confiants ou tout à fait confiants dans les réponses données. La confiance est plus élevée suite à l'usage de la carte interactive (57% tout à fait confiants) qu'avec la carte dynamique (27% tout à fait confiants). La confiance moyenne baisse légèrement pour la deuxième série de questions sur les causalités (50% de participants tout à fait confiants pour les tâches de recherche d'information, 33% tout à fait confiants pour les tâches de lecture des causalités). Ce résultat semble logique étant donné que le taux de bonnes réponses est effectivement moindre pour la deuxième série de questions.

Entre les deux séries, le passage de la modalité de carte dynamique (testée en première) à la carte interactive fait augmenter la confiance moyenne (de 36 % de participants tout à fait confiants à 50%), tandis que le passage à la carte dynamique (testée en deuxième) fait baisser la confiance moyenne (de 63 % de tout à fait confiant à 18%).

Il semble donc que la modalité de carte dynamique rende les participants moins sûrs d'eux.

Ces résultats semblent démontrer que la carte interactive est plus efficace que la carte dynamique pour les deux objectifs de tâches testés. Notre hypothèse initiale (cf. section VII.1.1) est donc rejetée.

Comme l'ordre des séries de tâches n'a pas été interverti au cours de l'expérimentation, il conviendra de vérifier que ces résultats ne sont pas dus à un effet de fatigue au cours du test, ce qui fait l'objet de la section VII.2.3.

2.2.3. Influence de la dimension de l'information interrogée dans la question

Lors de la construction de notre protocole, nous cherchions à savoir si les dimensions temporelles et spatiales de l'information avaient toutes deux le même degré de lisibilité dans l'interface. Dans le cas contraire, les questions portant sur le temps et l'espace à la fois, donc nécessitant a priori des interactions avec plusieurs modules de l'interface pour répondre, seraient plus difficiles pour notre public d'utilisateurs. Or, le nombre de questions de chaque type était trop faible pour analyser l'effet de la dimension interrogée, après avoir ôté les questions imprécises. Les questions de familiarisation (numérotées TF) ont donc été ajoutées à l'analyse.

Au premier abord, la dimension de l'information interrogée dans la question a bien un effet sur les résultats : le taux de bonnes réponses est le moins élevé pour les questions relatives à la fois au temps et à l'espace (70% de réponses correctes), comme l'illustre la Figure 4.22. Les questions portant uniquement sur le temps ont un taux de bonnes réponses (84%) légèrement inférieur à celui des questions qui portent sur l'espace et sur la thématique (plus de 95% dans les deux cas). La différence de taux de bonnes réponses est statistiquement significative (intensité de la relation moyenne : 31%). La durée de réponse est, elle aussi, significativement plus longue pour les questions relatives à la fois au temps et à l'espace (intensité assez faible : 25%) (Figure 4.23).

Les résultats des participants sont donc plus faibles pour les questions qui portent à la fois sur le temps et sur l'espace. Deux pistes explicatives peuvent être envisagées : soit l'application est la moins efficace pour répondre à ce type de question, soit ce type de questions est simplement plus complexe.

Par ailleurs, les questions portant sur l'espace ont une durée avant le premier clic plus longue que les autres (Figure 4.25). Cet allongement de durée pour les tâches portant sur l'espace n'est statistiquement significative que lors de l'usage de la carte dynamique (intensité de la relation très faible : 8%).

On peut poser l'hypothèse explicative que la durée avant le premier clic constitue ici un temps de recherche visuelle dans l'espace de la carte pour localiser l'emplacement intéressant la question, avant de cliquer.

On observe que la modalité de carte dynamique a un taux de bonnes réponses légèrement plus faible (Figure 4.22) et une durée de réponse légèrement plus élevée (Figure 4.23) que la carte interactive, notamment pour les questions portant sur le temps ou sur le temps et l'espace à la fois. Ces deux dernières questions semblent donc être les plus complexes (résultats les moins bons). Ces résultats confirment que la carte interactive serait légèrement plus efficace que la carte dynamique, mais ces différences ne sont pas statistiquement significatives.

La durée de réponse plus longue avec la carte dynamique doit aussi être mise en regard du fait que cette modalité demande des traitements cognitifs supplémentaires lors de la réponse : le participant cherche d'abord si l'objet qui intéresse sa réponse est présent dans la carte et, si ce n'est pas le cas, il doit envisager l'action à réaliser pour l'afficher. Avec la carte interactive, en revanche, l'objet recherché est toujours affiché dans la carte.

L'écart au nombre de clics optimal est un indicateur atypique lorsqu'on le compare aux autres graphiques (Figure 4.24). Il est significativement plus élevé avec la carte dynamique (11 clics de plus que l'optimal en moyenne, contre 6 avec la carte interactive), notamment pour les questions portant sur l'espace (15 clics de plus que l'optimal) et sur la combinaison temps-espace (26 clics de plus que l'optimal). En revanche, la carte dynamique entraîne un moins grand écart au nombre de clics optimal pour les questions portant sur le temps que pour les deux autres dimensions. Pour la carte interactive, en revanche, l'écart au nombre de clics optimal est significativement plus faible pour les questions portant sur l'espace que pour les deux autres types.

Ces résultats laissent supposer que l'introduction de l'animation facilite l'accès à la dimension temporelle par rapport à la carte interactive, mais en revanche complique la lecture de la dimension spatiale.

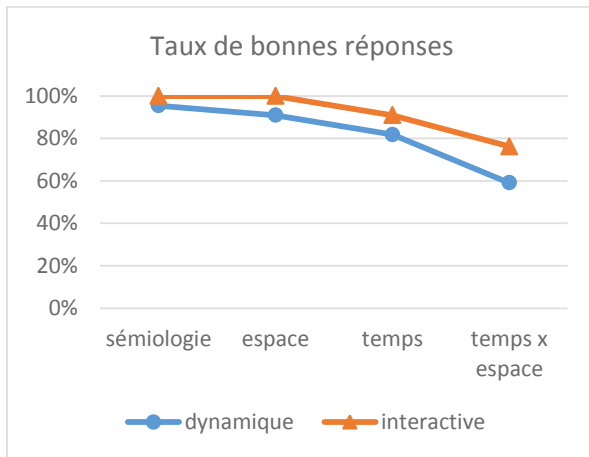


Figure 4.22. Taux de bonnes réponses selon la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte

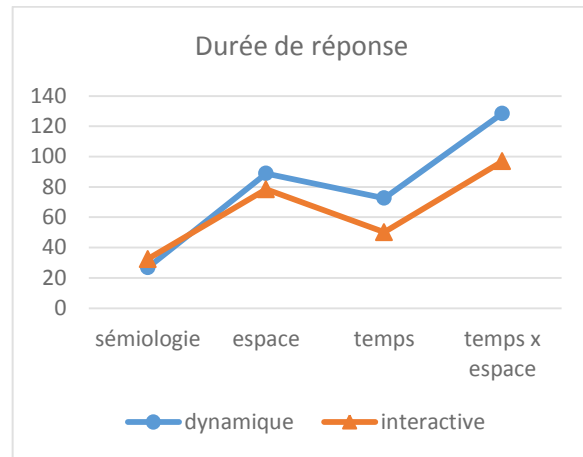


Figure 4.23. Durée moyenne de réponse (en secondes) en fonction de la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte

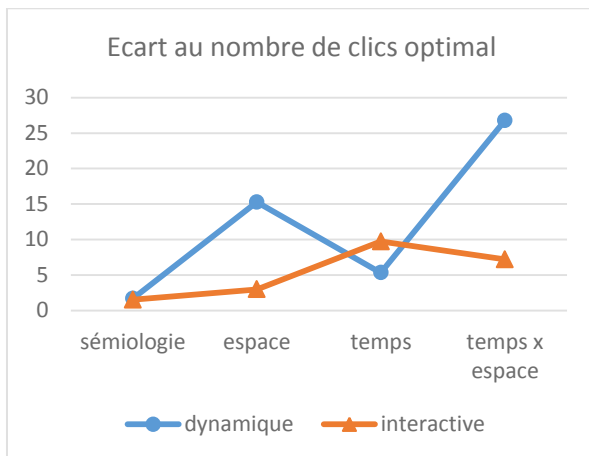


Figure 4.24. Ecart moyen au nombre de clics optimal selon la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte

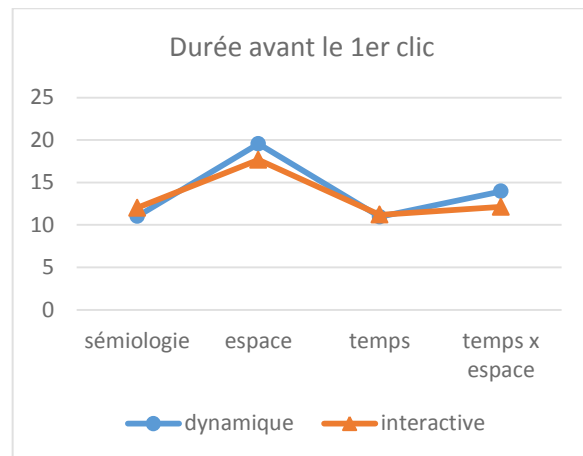


Figure 4.25. Durée moyenne avant le premier clic (en secondes) la dimension interrogée dans la question et la modalité de carte

Les résultats présentés dans cette section sont à nuancer du fait que la complexité cognitive des questions n'est pas indépendante de la dimension interrogée dans notre échantillon : la seule question de complexité « analyse », c'est-à-dire la plus complexe, était une question portant à la fois sur le temps et sur l'espace (Figure 4.26).

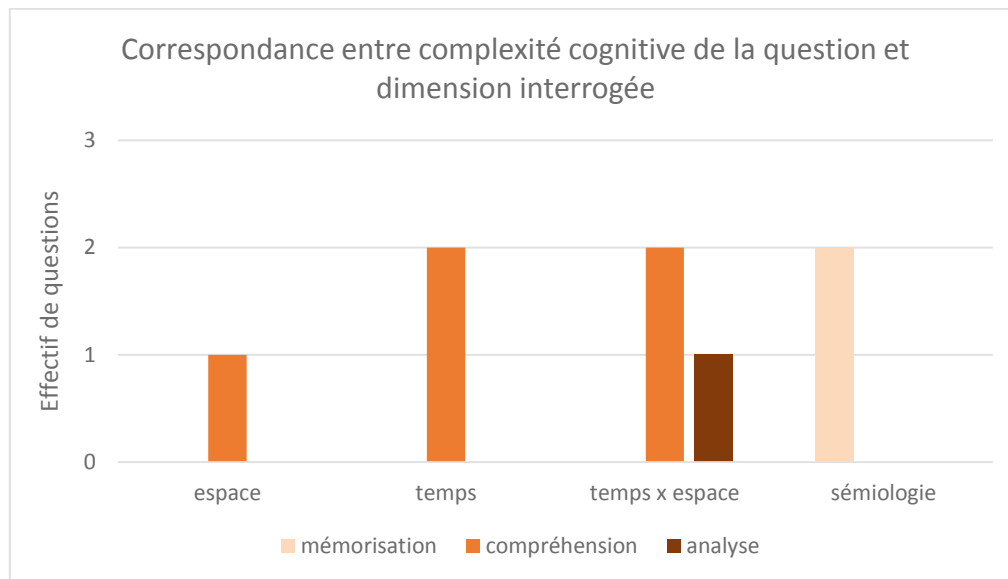


Figure 4.26. Effectif de questions par dimension de l'information interrogée et par complexité cognitive

Lorsqu'on se place à un niveau de complexité constant, en ne considérant que les questions de complexité « compréhension », on retrouve une tendance à l'opposition entre questions portant sur l'espace (95%) qui ont un taux de bonnes réponses supérieur aux questions portant sur le temps (84%). Les questions portant à la fois sur l'espace et le temps se retrouvent cette fois dans une position médiane (91% de bonnes réponses). Ces différences ne sont pas statistiquement significatives.

A complexité égale toujours, la durée de réponse reste bien significativement plus élevée pour les questions portant à la fois sur le temps et sur l'espace (intensité de la relation faible : 7,4%).

Les participants répondent donc bien avec moins d'efficacité aux questions portant à la fois sur le temps et l'espace, indépendamment de la complexité cognitive des questions.

L'analyse des traces d'utilisation permet d'observer quels composants de l'interface sont employés pour répondre selon la dimension interrogée dans la question.

Dans la Figure 4.27, la séquence d'actions de chaque participant (auquel est attribué un numéro identifiant, ici de 17 à 30) est représentée le long d'une ligne horizontale. La barre colorée principale indique la séquence des actions réalisées (1 couleur par action) et la couleur des motifs discontinus, plus petits et situés au-dessus de cette barre indique la question en cours lors de chaque interaction. La dimension interrogée dans la question est reportée avec des lettres : espace (E), temps (T) et espace et temps à la fois (E x T).

Patterns

■ : T1 - ■ : T2 - ■ : T3 - ■ : T5 - ■ : T7 - ■ : T8

Actions

■ : ptSelecCarte - ■ : ptDeselecCarte - ■ : ptSelecT1 - ■ : ptDeselecT1 - ■ : lecture - ■ : pause - ■ : animPrec - ■ : animSuiv - ■ : animDebut - ■ : animFin
 ■ : supprSelecEnCours - ■ : decocheLegende - ■ : cocheLegende

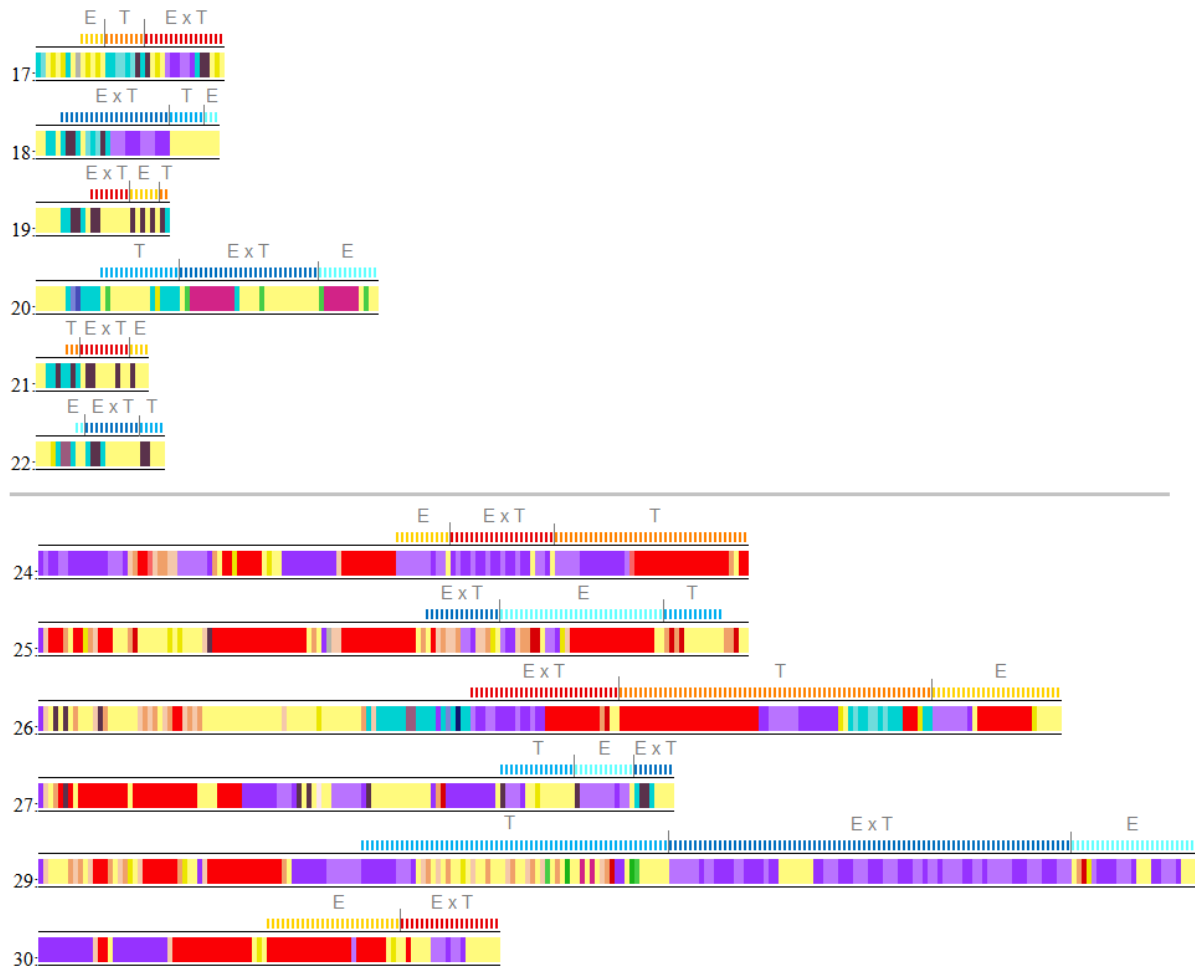
Timelines

Figure 4.27. Quelques exemples de traces d'utilisation avec la carte interactive (participants n°17 à 22) et avec la carte dynamique (participants n°24 à 30), visualisées avec le logiciel UT-Orange.

Les traces d'utilisation permettent d'observer que la dimension interrogée dans la question a une influence sur l'orientation vers les différents modules de l'interface :

- avec la carte interactive, les participants cliquent fréquemment sur les événements dans la ligne de temps pour les questions portant sur le temps ou bien sur la combinaison espace-temps, c'est-à-dire les questions T1, T7 et T8,
- avec la carte interactive toujours, ils sélectionnent majoritairement les événements via la carte pour les questions qui portent sur l'espace, c'est-à-dire T2, T3 et T5,
- avec la carte dynamique, les participants interagissent moins avec la ligne de temps, qui semble remplacée par des interactions nombreuses avec les contrôles interactifs

de l'animation. Sur l'échantillon de trace de la Figure 4.27, seuls les participants 25 et 29 utilisent la lecture automatique de l'animation en alternant avec des pauses fréquentes, tandis que les autres utilisent uniquement le défilement manuel (boutons « aller à l'étape précédente » ou « à l'étape suivante »).

L'observation des traces d'utilisation permet d'observer que, lors de l'usage de la modalité de carte dynamique, les participants ont peu recours à la ligne de temps, alors qu'ils l'utilisent beaucoup avec la modalité interactive.

La dimension interrogée dans la question a une influence sur les modules de l'interface employés, uniquement lorsque la modalité de carte interactive est utilisée : les participants interagissent d'avantage avec la ligne de temps pour les questions portant sur la dimension temporelle, ce qui semble logique.

Les traces d'utilisation permettent donc d'enrichir qualitativement l'analyse et d'observer les comportements mis en œuvre par les utilisateurs lors de leurs réponses. Nous les évoquons ici mais leur apport a d'avantage été exploré dans l'analyse de la tâche complexe (cf. section 2.5).

2.2.4. Influence de la complexité de la question

A la fin de chaque série de questions, on demandait aux participants s'ils pensaient que leur durée de réponse reflétait la difficulté de la question. Pour la première série de questions sur la recherche d'informations, 36% des participants ont répondu « oui ». De nombreux participants ont paru perplexes et ont affirmé qu'ils n'avaient pas vu que certaines questions étaient particulièrement plus difficiles que d'autres. Pour la deuxième série de questions, en revanche, 66% des participants ont pensé que leur temps de réponse reflétait bien la complexité des questions.

La deuxième série de questions concernant la lecture des relations de causalité serait donc plus complexe que les questions de recherche d'information, ce qui est confirmé par nos résultats.

Les questions avec un niveau de complexité « analyse » ont obtenu significativement moins de bonnes réponses (-60% par rapport aux questions de « compréhension » - intensité de la relation : 56%) et une durée de réponse significativement plus longue (+42s par rapport aux questions de compréhension - intensité de la relation : 31%) que les autres types de question. Ces statistiques sont vraies pour les deux modalités de carte. Le taux de bonnes réponses des participants est comparable pour les questions de complexité « mémorisation » et « compréhension » (Figure 4.28), mais la durée de réponse est plus longue lorsque la complexité augmente (Figure 4.29).

Il existe donc une relation forte entre complexité croissante des questions et baisse des

résultats.

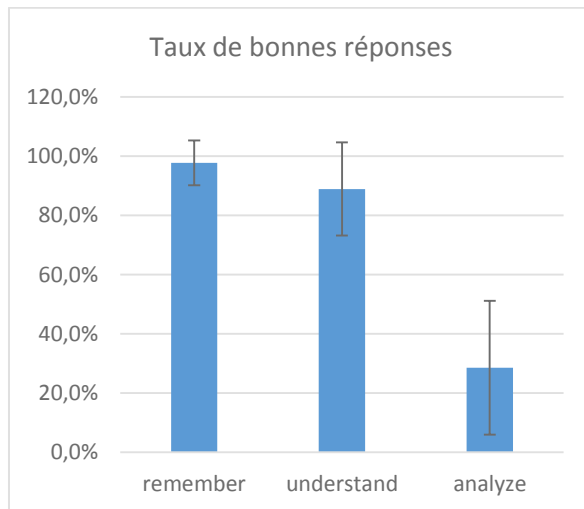


Figure 4.28. Taux de réponses correctes selon la complexité des questions

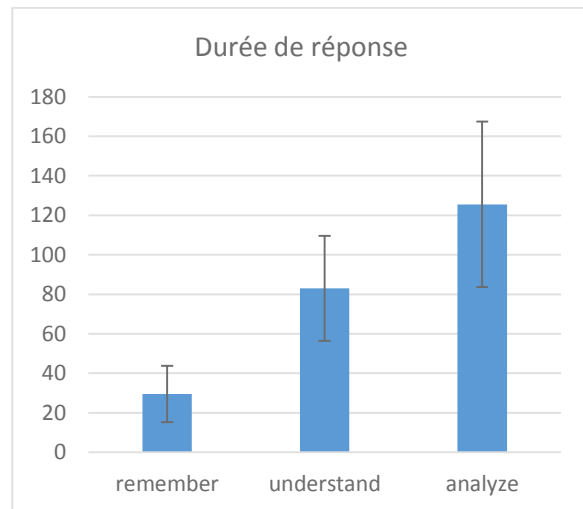


Figure 4.29. Durée moyenne de réponse (en secondes) selon la complexité des questions

Par ailleurs, l'écart au nombre de clics optimal est plus élevé pour le niveau de complexité « analyse », quelle que soit la modalité de carte, mais la différence n'est significative que dans le cas de la carte dynamique (Figure 4.32).

De manière générale, la carte dynamique donne des résultats significativement moins bons que la carte interactive seulement dans le cas où la question a un niveau de complexité « analyse » : taux de bonne réponse plus faible (Figure 4.30), durée de réponse et nombre de clics plus élevés (Figure 4.31 et Figure 4.32).

Grâce aux traces d'utilisation, on observe que la question de complexité « analyse » modifie le comportement de 81% des participants. 71% des participants ont utilisé plus souvent une combinaison d'interaction entre la carte et la ligne de temps que pour les autres questions. Cela semble faire écho au fait que la seule question de complexité « analyse » interroge à la fois le temps et l'espace. Ceux qui n'ont utilisé que la carte ou que la ligne de temps ont tous donné une réponse incorrecte.

L'utilisation conjointe de la carte et de la ligne de temps présente donc un gain réel d'efficacité pour les questions portant sur la combinaison temps-espace.

43% des participants ont réalisé un nombre plus grand d'interactions pour la question de complexité « analyse » que pour les autres. Quelques participants (14%) ont d'avantage utilisé les filtres pour masquer certains symboles d'événements lors de cette question.

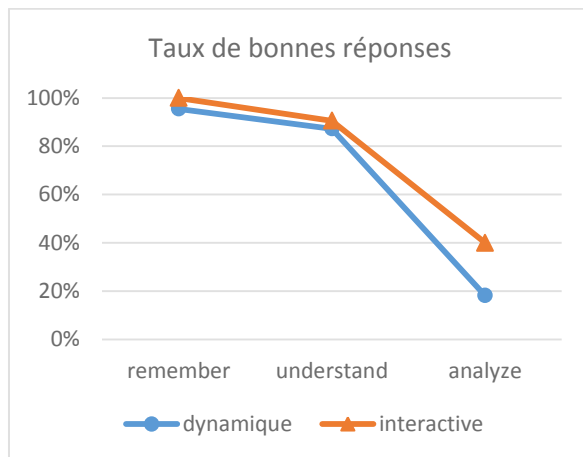


Figure 4.30. Taux de bonnes réponses selon la complexité de la question et la modalité de carte

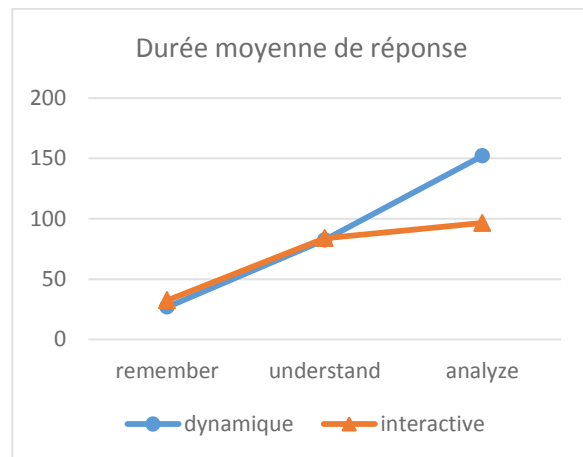


Figure 4.31. Moyenne des durées de réponse (en secondes) selon la complexité de la question et la modalité de carte

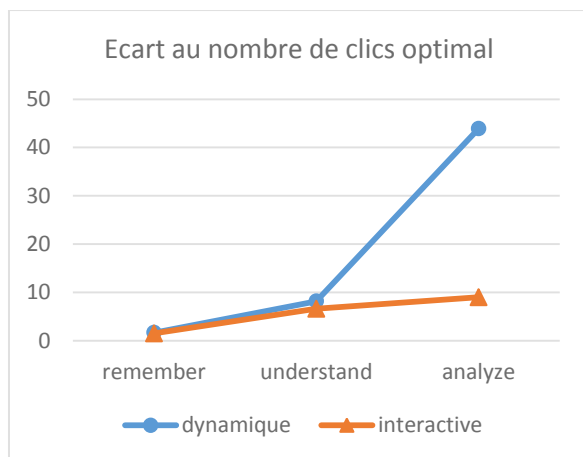


Figure 4.32. Ecart au nombre de clics optimal selon la complexité de la question et la modalité de carte

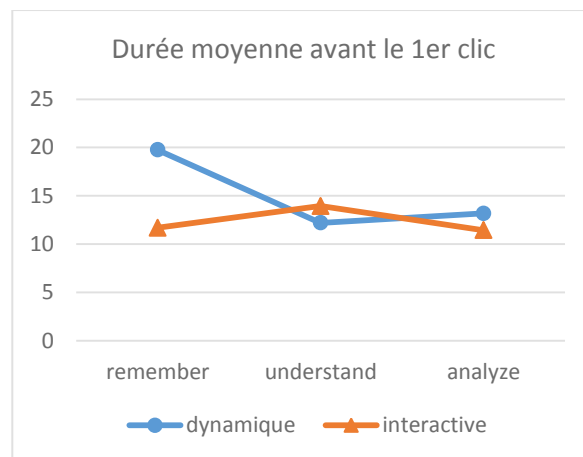


Figure 4.33. Durée moyenne avant le premier clic (en secondes) en fonction de la complexité de la question et de la modalité de carte

La durée avant le premier clic est une métrique atypique. Lorsque la carte dynamique est utilisée, la durée avant le 1^{er} clic est la plus élevée pour les questions de complexité « mémorisation », pourtant les plus simples. Cela peut s'expliquer par deux facteurs :

- Les questions de ce niveau de complexité sont, pour 2 sur 3, des tâches dites « de familiarisation avec l'interface », qui viennent en premier dans chaque série. Lors de l'observation au cours du test, il a été remarqué que certains participants semblaient déroutés, lors du lancement de la carte dynamique, par le fait que la carte soit vide d'événements ; ils parcouraient alors visuellement l'interface pendant un instant avant de penser à où de trouver comment lancer l'animation.
- La troisième question de complexité « mémorisation » portait sur l'espace et nous avons montré que la durée moyenne avant le premier clic est toujours plus longue pour les questions portant sur cette dimension (cf. section VII.2.2.3).

Ces résultats nous informent que la durée avant le premier clic n'est pas liée à la complexité cognitive des questions. En revanche, elle semble dénoter un temps d'hésitation des participants qui cherchent à définir vers quel composant de l'interface s'orienter pour trouver la réponse à leur question.

C'est ce que Norman (1991) nomme le « golfe de l'exécution ». Selon Norman, un utilisateur doit franchir deux obstacles pour utiliser une visualisation :

- le golfe de l'exécution : « comment faire pour traduire la question que je veux poser en actions dans l'interface ? »
- le golfe de l'évaluation : « comment j'interprète ce qui s'affiche ? »

La modalité de carte dynamique semble donc poser des problèmes de formulation d'actions à certains utilisateurs. C'est ce qui peut expliquer qu'elle nécessite une plus grande durée de réponse. Comme cet effet n'a été observé que lors de la première question de la série avec la carte dynamique, nous pouvons poser l'hypothèse que cet effet est partiellement gommé par l'apprentissage.

2.2.5. Comportement lors des questions imprécises

Les questions T2 et T8 comportaient une imprécision dans l'énoncé qui rendait la réponse ambiguë. 59% des participants ont remarqué l'imprécision sur T2 et 50% l'ont remarquée sur T8.

D'après les observations durant le test, face à l'imprécision, le comportement des utilisateurs se traduit par une recherche plus longue dans les données (ex : clic sur tous les événements spatialement proches du point où devrait se trouver l'information) et/ou par une réponse tranchée (ex : « dans le doute, je réponds que oui » / « que non », les deux comportements ayant été observés). Il est impossible d'évaluer si la réponse donnée est vraie ou fausse, puisque cela dépend de l'interprétation du répondant.

A complexité de question égale (en ne conservant que les questions de complexité « compréhension »), le fait que la question soit imprécise augmente le temps de réponse moyen de 47s. L'imprécision n'a pas d'effet significatif sur le nombre de clics ni sur la durée avant le premier clic.

Les traces d'utilisation révèlent des réactions différentes face à l'imprécision selon que la modalité utilisée est la carte interactive ou dynamique. Avec la carte interactive, les participants ne modifient leur comportement que s'ils sont en train de répondre à la question T8 (complexité « compréhension », portant sur le temps). Les traces pour la question T2 (complexité « mémorisation », portant sur l'espace) sont similaires à celles des autres questions. Les changements de comportements sont soit un plus grand nombre de clics dans la carte (pour 2 participants), un plus grand nombre de clics dans la ligne de temps (1 participant) ou la concentration sur une seule fonctionnalité au détriment des autres (1 participant).

Les participants utilisant la carte dynamique sont plus nombreux à changer de comportement par rapport au cas interactif. Les changements sont semblables à ceux observés avec la carte interactive : le clic sur plus de points de la carte ou des interactions plus nombreuses avec les contrôles de l'animation (pour 9 participants), la concentration sur une seule fonctionnalité au dépend des autres (3 participants) ou l'utilisation plus grande des filtres d'événements (2 participants). Les trois participants qui se sont concentrés sur une seule fonctionnalité utilisaient tous la carte dynamique à la dernière étape de l'animation, c'est-à-dire avec tous les événements affichés comme dans le cas interactif.

Certains participants modifient donc leur comportement lorsqu'ils sont confrontés aux questions imprécises. Ils sont plus nombreux à le faire lors de l'usage de la carte dynamique.

Ces modifications de comportement ressemblent à un état de surcharge cognitive, dans lequel les participants essaient de diminuer la charge cognitive intrinsèque de la géovisualisation en diminuant le nombre d'objets affichés ou saillants ou de limiter la charge extrinsèque en diminuant le nombre de fonctionnalités utilisées. L'imprécision semble en tout cas clairement engendrer une détresse, qui se traduit par l'adaptation des comportements.

2.2.6. Influence du profil des participants

Profils et résultats

On remarque une grande variabilité des mesures d'efficacité entre participants : entre 63% et 100% de bonnes réponses, une durée moyenne de réponse qui varie entre 35s et 154s (x4,4), une durée moyenne avant le 1^{er} clic allant de 6s à 28s (x4,7) et entre 5 et 40 clics en moyenne pour répondre aux questions (x8). L'analyse qualitative de ces différences fournit des pistes pour déterminer d'où elles proviennent.

Tout d'abord, il existe une relation entre un taux de bonnes réponses élevé et une plus grande habitude du thème inondation. Cette relation est forte (intensité de la relation de 49%).

Les participants qui se définissent comme experts de la thématique « inondation » ont donc en moyenne de meilleures réponses que les autres. Aucun des participants ne connaissait l'inondation de 1947 dans les Vosges visualisée ici, donc les connaissances antérieures de l'événement n'ont pas d'influence sur ce résultat.

Il n'y a en revanche pas de relation entre le taux de bonnes réponses et l'habitude d'utiliser les outils manipulés, c'est-à-dire les cartes, les outils informatiques ou les archives historiques, ni avec les caractéristiques démographiques des participants.

Le seul indicateur intra-participant corrélé avec la durée de réponse est l'habitude ressentie d'utiliser des sources de données historiques informatisées. Cette relation n'est vraie que

lorsque la modalité de carte dynamique est en cours d'utilisation (Figure 4.34) : les participants qui pensent utiliser très souvent des sources de données informatisées mettent en moyenne plus de temps à répondre aux questions avec la carte dynamique que les autres. Ces 5 participants ont tous de bons résultats aux questions (0 ou 1 erreur sur 8 questions), ils travaillent régulièrement à très souvent sur le thème des inondations, utilisent des logiciels métier régulièrement à très souvent, et estiment utiliser des cartes très souvent, que ce soit pour trouver des itinéraires ou pour prendre des décisions. Bien que cette relation de corrélation ne vaille pas causalité, une interprétation possible est que ces participants utilisent plus longuement la carte dynamique pour répondre car ils sont plus à l'aise que les autres avec ce type de source de données. Il est également possible qu'ils cherchent à augmenter la précision ou la complétude des informations collectées.

Une plus grande durée de réponse peut donc dans ce cas refléter une certaine aisance d'usage ou une ténacité à trouver la réponse la plus complète possible.

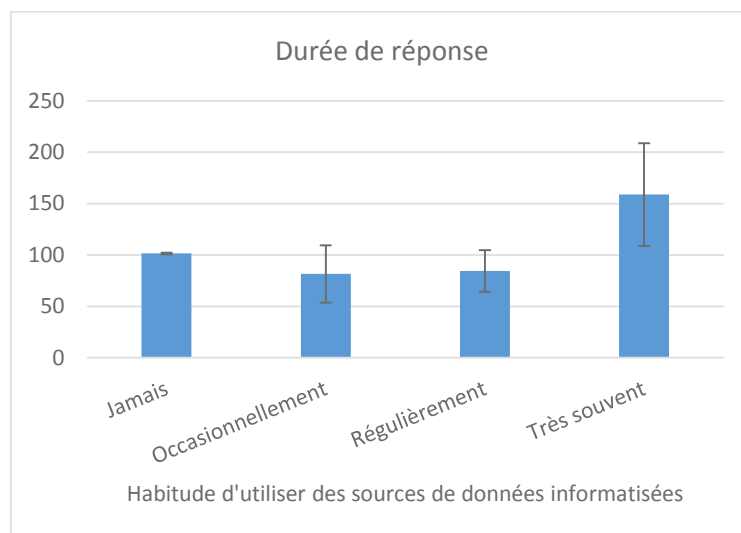


Figure 4.34. Durée de réponse (en secondes) en utilisant la carte dynamique, en fonction de l'habitude ressentie d'utiliser des sources de données informatisées

A l'échelle des individus, on observe de grandes disparités dans le nombre de clics selon les participants. 7 participants sur 21 (33%) ont 50% ou plus de réponses proches du nombre optimal de clics, 9 participants (42%) ont une ou deux réponses proches du nombre optimal de clics et 5 participants (24%) n'ont aucune réponse proche du nombre optimal de clics.

Il y a une relation significative entre l'âge des participants et le nombre de clics, uniquement avec la carte dynamique, avec un risque d'erreur α de 5%. Cette relation doit être considérée avec précaution car elle a une intensité faible (15,7%) et, lorsqu'on considère un risque d'erreur égal à 1%, elle n'est plus significative. Elle nous informe que, dans notre échantillon, ceux qui cliquent le plus sont les participants entre 30 à 39 ans, suivis par les participants entre 20 et 29 ans et, enfin, les plus de 40 ans qui cliquent le moins. La non-linéarité de cette relation rend difficile de poser une interprétation. Peut-être le nombre de clics n'est-il pas lié

à l'âge en lui-même mais à des caractéristiques des participants qui sont dépendantes de leurs tranches d'âge. Ces caractéristiques sont a priori extérieures à celles collectées dans notre questionnaire. L'observation directe a montré que certains participants semblent réticents à interagir avec la géovisualisation et cherchent à répondre aux questions sans cliquer, tandis que d'autres, peut-être plus à l'aise et curieux, cliquent partout parfois sans cohérence avec la question posée.

Par ailleurs, le nombre de clics est plus élevé, uniquement avec la carte dynamique, pour les participants qui utilisent des archives papier très souvent. Encore une fois, cette relation est significative mais faible (intensité : 12%) et n'est plus vraie avec un risque d'erreur égal à 1%.

Les participants qui ont le nombre de clics moyen le plus élevé ont en fait une ou deux questions qui leur ont demandé un nombre de clics très grand, le plus souvent lors de l'usage de la carte animée. Ils sont pour la plupart à l'aise avec l'informatique et les cartes, et leurs caractéristiques démographiques sont variées.

Trois facteurs expliquant les nombres de clics les plus élevés ont pu être dégagés grâce à l'observation des participants pendant le test :

- soit, lors de la première lecture de l'animation, le participant inspecte chaque étape événement par événement, dans l'objectif apparent de mémoriser le récit et de s'en resservir par la suite,
- soit il vérifie une réponse trouvée en cherchant un contre-exemple dans la carte,
- soit le participant n'a pas trouvé l'information demandée après un premier balayage de l'animation. Dans ce cas, il tente de retrouver l'information en re-balayant chaque étape de l'animation minutieusement. L'un des participants concerné a spontanément justifié sa longue durée de réponse en disant qu'il s'attendait à trouver l'information à une certaine localisation de la carte lors du premier passage de l'animation, et qu'il n'avait donc pas prêté attention aux autres zones. Cela démontre une occultation volontaire d'une partie du contenu de l'animation, sur la base d'une anticipation du résultat.

Les participants ayant les durées avant le premier clic les plus élevées sont tous des personnes de plus de 40 ans avec plus de 5 ans d'ancienneté dans l'entreprise. Leurs autres caractéristiques varient. On peut supposer que ces participants sont moins familiers des outils de géovisualisation, bien que cela n'ait pas été formellement interrogé dans le questionnaire d'auto-évaluation. Ces participants ont également tous débuté le test avec la modalité de carte dynamique, sauf un, et ce participant à part est le tout premier à avoir passé le test, ce qui peut signaler un biais dû à l'expérimentateur (manque d'habitude, explications moins nettes) dans cette toute première session. Le fait que les durées avant le premier clic les plus élevées soient toutes durant l'usage de la carte dynamique laisse présager une influence du type de carte testé en premier sur les résultats, piste qui sera approfondie dans la section VII.2.3.2.

Comportements d'utilisation

Les comportements d'utilisation ont été analysés séparément pour la carte interactive et pour la carte dynamique, sur la base des traces d'utilisation enregistrées.

Avec la carte interactive, les fonctions les plus utilisées dans l'interface sont :

- la sélection de points dans la carte,
- la sélection de points dans la ligne de temps,
- la réinitialisation de la sélection (pour désélectionner tout) et
- le filtre d'événement via les cases à cocher.

Certaines autres fonctions sont faiblement utilisées : deux participants ont utilisé la fonction pour conserver l'historique des descriptions et quatre participants ont eu recours à la ligne de temps détaillée et proportionnelle aux événements.

Durant l'utilisation de la carte interactive, on distingue trois comportements d'utilisation :

- des participants qui ont beaucoup interagi avec l'interface (nombre de clics globalement élevé) et beaucoup interagi avec la ligne de temps (29% des participants),
- d'autres qui ont interagi modérément avec l'interface et peu avec la ligne de temps (38%) et
- des participants qui ont interagi peu avec l'interface et peu avec la ligne de temps (33%).

Les participants qui interagissent beaucoup avec la ligne de temps sont en majorité ceux qui utilisent la carte interactive en seconde modalité (i.e. pour répondre aux questions sur les causalités). Ceux qui utilisent la carte interactive pour répondre aux questions de recherche d'information (donc qui utilisent la carte interactive en 1^{er}) sont plus nombreux à interagir peu avec la ligne de temps. Cette relation n'est cependant pas statistiquement significative.

Ces résultats peuvent laisser supposer que l'usage de la carte animée en première modalité favorise l'exploration de la dimension temporelle, y compris après le passage à la carte interactive. Néanmoins, ce résultat n'est pas généralisable en dehors de notre échantillon de participants et devra faire l'objet d'une étude ultérieure.

Pour ce qui est de l'utilisation des filtres d'événements, 38% des participants les utilisent beaucoup, 19% les utilisent modérément et 43% ne les utilisent jamais. Les proportions sont semblables pour les questions de recherche d'information et de lecture des causalités. Quand la quantité d'interaction augmente, que ce soit avec le nombre d'interactions global, avec la ligne de temps ou avec les filtres d'événements, alors la durée de réponse augmente, ce qui paraît logique. Cependant, il n'y a pas de relation avec le taux de bonnes réponses.

Avec la carte dynamique, les fonctions les plus utilisées sont les mêmes que pour la carte interactive, mais des fonctions de contrôle de l'animation s'y rajoutent :

- la sélection de points dans la carte,
- la sélection de points dans la ligne de temps,
- les contrôles de l'animation (lecture, pause, changement d'étapes),
- le bouton « aller tout à la fin de l'animation » et
- le filtre des événements via les cases à cocher.

D'autres fonctions sont utilisées plus marginalement : deux participants utilisent la conservation de l'historique des descriptions (participants différents de ceux qui l'ont utilisée avec la carte interactive) et 6 participants utilisent la ligne de temps sous forme détaillée et/ou proportionnelle aux événements (3 d'entre eux l'ont également utilisée dans la carte interactive).

L'observation en cours de test montre que de nombreux participants commencent par regarder l'animation étape par étape, puis soit ils semblent se lasser et reprennent le contrôle manuel, soit ils paniquent aux étapes où de nombreux événements surviennent simultanément et ils stoppent l'animation.

Très peu de participants regardent longuement l'animation en défilement automatique. La plupart reprennent le contrôle manuel rapidement. Cela semble provenir d'une lassitude, lorsque l'animation est trop lente, ou d'une surcharge lorsqu'elle est trop complexe.

On distingue trois types de comportements d'usage de l'animation :

- 45% des participants vont à la fin de l'animation et se ramènent donc au cas interactif, la proportion étant légèrement plus élevée pour ceux qui utilisaient la carte dynamique en seconde modalité (55%).
- 23% des participants utilisent exclusivement l'animation (lecture, pause et contrôles manuels). Il s'agissait majoritairement de personnes ayant utilisé la carte animée en 1^{er}. Notons que deux participants (9%) utilisant la carte dynamique en 1^{ère} modalité, n'ont jamais utilisé les fonctions de contrôle interactif de l'animation.
- Enfin, 32% des participants ont utilisé un mélange des deux méthodes, tantôt le cas équivalent à la carte interactive avec tous les événements affichés, tantôt l'animation. Les participants de ce groupe ont utilisé pour moitié la carte dynamique en première ou en seconde modalité.

Ces différents comportements n'ont pas d'impact significatif sur les mesures quantitatives (taux de bonnes réponses, durée de réponse, etc.).

Pas de comportement idéal

Les 3 participants qui ont des scores parfaits (100% de bonnes réponses) cliquent en moyenne peu dans l'interface (nombre d'interaction moyen à faible, peu d'interactions avec la ligne de temps par rapport au nombre de clics total). Leur mode d'interaction avec l'animation et avec les filtres d'événements est très variable : ce n'est donc pas ce facteur qui influence leur score.

Les traces d'utilisation ne révèlent pas de réelle similitude entre leurs comportements, pas plus qu'on ne voit de différence notable d'avec les autres participants.

La stratégie d'interaction utilisée n'est pas le déterminant majeur expliquant le taux de bonnes réponses.

On peut alors supposer que les différences de scores sont plutôt liées à des différences interindividuelles non mesurées ici (donc extérieures aux affinités avec l'informatique, les données historiques et les cartes) et peut-être également à des différences contextuelle (ex : état d'esprit du participant au moment du test, degré de fatigue, heure de la journée, ...).

2.3. Effets d'apprentissage et de fatigue

Lorsqu'une expérience est organisée en une série d'essais successifs, on doit poser l'hypothèse que la performance à un essai donné peut être influencée par les essais antérieurs : ce phénomène est appelé effet de transfert (Légal, 2010). Il peut être positif (apprentissage, i.e. facilitation de la performance par familiarisation) ou négatif (fatigue, lassitude ou découragement, qui produisent une diminution de la performance). Pour éviter que ces effets n'influencent les résultats d'analyses statistiques, on présente les modalités de variables indépendantes dans un ordre différent selon les participants. C'est ce que nous avons instauré pour l'ordre de présentation des modalités de carte et l'ordre des questions portant sur différentes dimensions de l'information. Il peut être intéressant de regarder s'il existe réellement un effet de l'ordre des questions sur les résultats.

2.3.1. Effet de l'ordre des questions

Au cours de l'expérimentation, l'apprentissage du fonctionnement de l'interface était souhaité et induit par trois dispositifs : la phase de tutoriel, la question d'entraînement et les questions de familiarisation, intervenant avant chaque série de tâches réelles. Il serait donc logique que l'effet d'apprentissage ne soit pas flagrant sur ces tâches réelles (en position 3 à 5 et 8 à 10 dans l'ordre des questions), ce qui est confirmé par les résultats expérimentaux (Figure 4.35). Notons que les participants qui ont eu de meilleurs résultats aux questions d'entraînement ont significativement de meilleurs résultats aux questions suivantes.

Cela laisse supposer que les résultats ne sont pas qu'une question d'apprentissage mais

sont variables en fonction des individus.

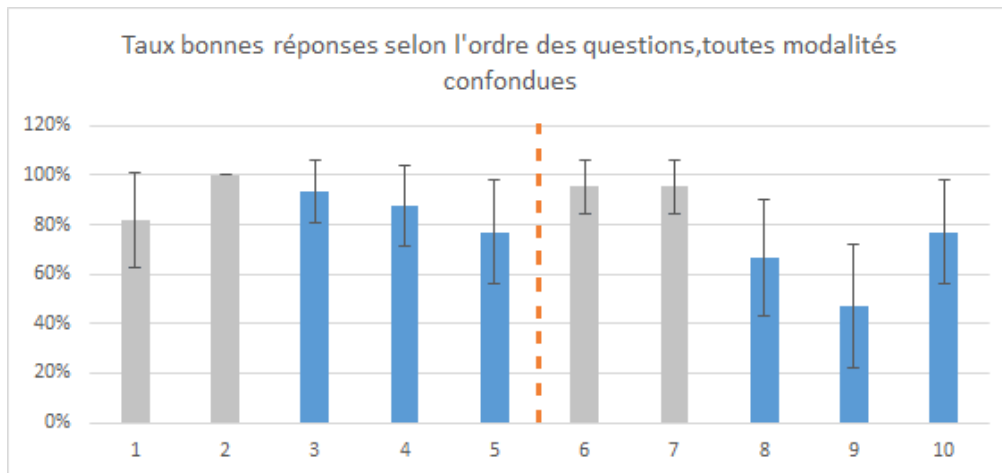


Figure 4.35. Taux de bonnes réponses en fonction de l'ordre des questions (les taux correspondant aux questions de familiarisation sont grisés)

A contrario, une augmentation de la durée de réponse au cours du test est bien observée, qui pourrait traduire un effet de fatigue ou de lassitude. L'augmentation de la durée de réponse est vraie pour toutes les séries de questions, mais n'est significative que pendant la deuxième série sur les causalités, que ce soit avec la carte interactive (intensité de la relation assez faible : 11,6%) ou avec la carte dynamique (intensité de la relation moyenne : 28%).

Un effet de fatigue significatif est donc observé sur la série de questions de lecture des causalités.

Avec la carte interactive, on observe que l'écart au nombre de clics optimal augmente au cours de la première série de questions (recherche d'information) (intensité : 14%), mais pas sur la deuxième série. Avec la carte dynamique, l'écart au nombre de clics optimal augmente sur l'ensemble du test (relation très faible, intensité : 6%) mais pas à l'intérieur de chaque série unitaire. Ces résultats laissent penser qu'il peut exister une influence de l'ordre de test des modalités de carte sur la fatigue.

2.3.2. Effet de la modalité de carte testée en premier

Du fait que les séries de question n'aient pas été interverties dans notre test, il existe une confusion entre les effets dus à l'objectif des questions (recherche d'information et lecture des causalités) et l'ordre de test des modalités de carte. Néanmoins, les résultats nous amènent à suspecter que l'ordre de test des deux modalités de cartes a bien un rôle.

La durée avant le premier clic, qu'on peut assimiler à une hésitation ou une prise d'élan, est significativement plus longue lorsque la carte dynamique a été testée en 1^{ère}, quelle que soit la modalité de carte en cours d'utilisation. Dans la section VII.2.2.4, nous avons posé

l'hypothèse que la carte dynamique engendrait un « golfe de l'exécution », c'est-à-dire l'hésitation sur la manière de formuler la requête dans l'interface, dont l'effet était gommé par l'apprentissage. Or il semble que cet effet persiste malgré l'augmentation de la familiarité avec l'interface au fil du test.

Utiliser la carte dynamique en première modalité rendrait donc les utilisateurs plus hésitants face à l'interface.

Par ailleurs, la durée avant le premier clic augmente avec l'ordre des questions lors de l'usage de la carte dynamique, ce qui peut témoigner d'un effet de fatigue (Figure 4.36). En revanche, elle diminue légèrement au fil des questions lorsque la carte interactive est testée en 2^{ème} (Figure 4.37).

Une interprétation possible de ce résultat serait que, bien qu'ayant débuté avec la carte dynamique, en manipulant la carte interactive les participants prendraient confiance dans leur usage de la visualisation et hésiteraient de moins en moins dans leurs réponses, d'où une durée avant le premier clic qui diminue.

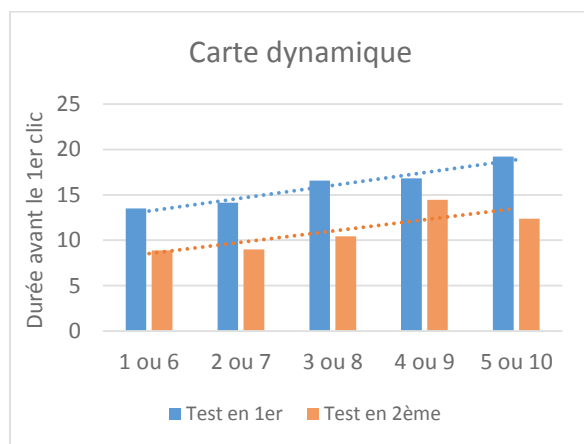


Figure 4.36. Moyenne de la durée avant le premier clic (en secondes) sur la carte dynamique, selon l'ordre des questions

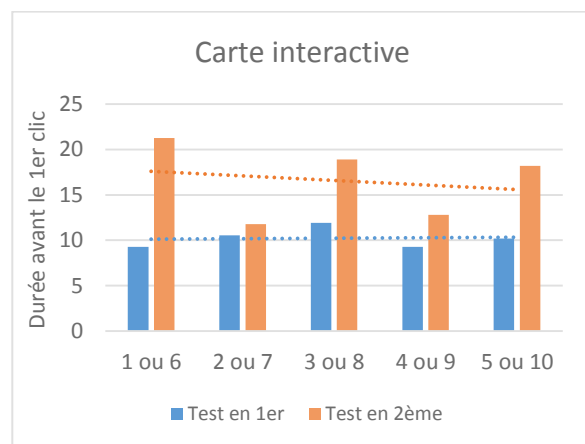


Figure 4.37. Moyenne de la durée avant le premier clic (en secondes) sur la carte interactive, selon l'ordre des questions

L'écart au nombre de clics optimal suit la tendance inverse : l'usage de la carte interactive en 1^{er} favorise un nombre plus élevé d'interactions que lorsque la carte dynamique est utilisée en 1^{er} (Figure 4.38 et Figure 4.39).

En reprenant l'hypothèse émise ci-dessus lors de l'analyse de la durée avant le premier clic, la carte dynamique serait donc moins intuitive voire décourageant l'interaction par rapport à la visualisation interactive.

Cette interprétation est confortée par le fait que les participants disent avoir moins confiance en leurs réponses lors de l'usage de la carte dynamique (cf. section VII.2.2.2).

Selon cette hypothèse, un nombre de clics plus élevé pourrait figurer une plus grande

aisance dans la manipulation de la carte. Cependant, cela va à l'encontre d'un autre résultat obtenu selon lequel un nombre de clics élevé est corrélé à une réponse incorrecte.

Il est possible que le nombre de clics soit donc soumis à deux effets antagonistes, l'un positif, lié à l'aisance des participants, et l'autre négatif, lié à une plus grande difficulté à trouver la réponse. Il est donc délicat de conclure sur la signification d'un nombre de clics élevé. Cette variable nécessiterait d'être explorée plus avant dans une expérimentation ultérieure, par exemple en étudiant plus finement sur quels composants de l'interface portent les clics.

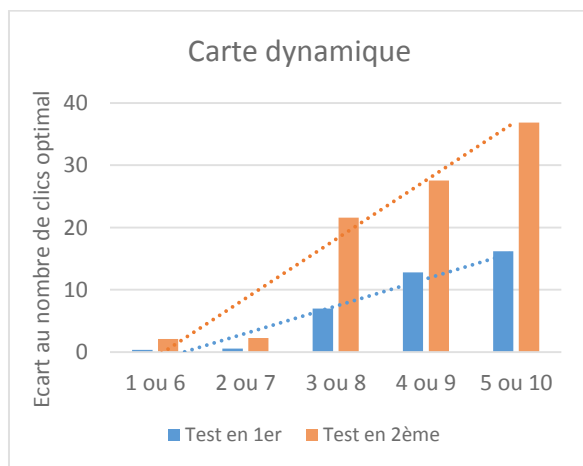


Figure 4.38. Evolution de l'écart au nombre de clics optimal selon l'ordre des questions, avec la carte dynamique

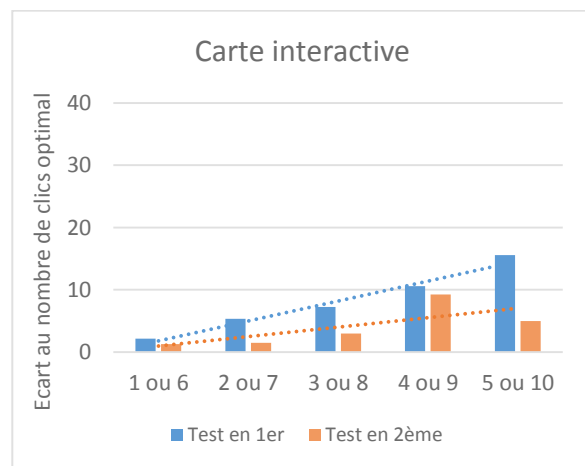


Figure 4.39. Evolution de l'écart au nombre de clics optimal selon l'ordre des questions, avec la carte interactive

Le taux de bonnes réponses, quant à lui, baisse significativement dans la série où la carte dynamique est utilisée en 2^{ème} (Figure 4.40), ce qui tend à confirmer que cette modalité de carte est plus complexe à utiliser et engendre un effet de fatigue plus élevé.

Si l'effet de fatigue est bien observé, la modalité de carte testée en premier n'a en revanche pas d'influence sur le taux de bonnes réponses global à cette 2^{ème} série de questions (77% de bonnes réponses en moyenne si la carte dynamique a été testée en 1^{ère}, contre 80% pour la carte interactive).

L'analyse de la durée de réponse n'apporte pas d'informations complémentaires aux autres paramètres.

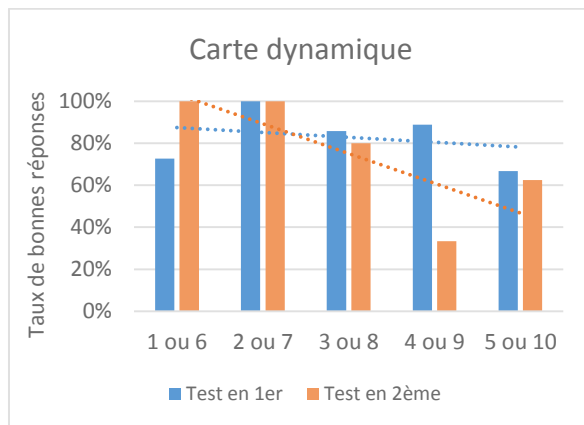


Figure 4.40. Taux de bonnes réponses selon l'ordre des questions, avec la carte dynamique

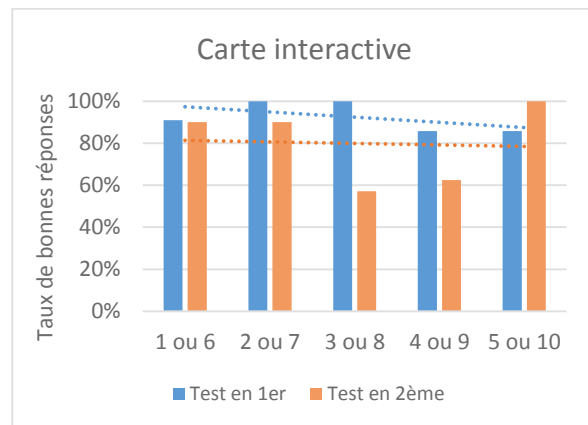


Figure 4.41. Taux de bonnes réponses selon l'ordre des questions, avec la carte interactive

2.4. Préférences des participants

2.4.1. Utilisabilité des cartes interactive et dynamique

Concernant l'utilisabilité de l'interface, 95% des participants trouvent que la carte sous forme interactive est plutôt ou très facile à utiliser et 81% pensent de même pour la carte dynamique (Figure 4.42). La facilité d'utilisation ressentie est fortement dépendante de l'ordre dans lequel les modalités ont été testées. En effet, quelle que soit la modalité de carte, celle-ci est jugée en moyenne plus facile à utiliser si elle a été testée en premier (Figure 4.43 et Figure 4.44). On peut poser l'hypothèse que la carte testée en second amène les participants à déconstruire leur schéma d'apprentissage acquis lors du test de la première carte. La déconstruction du schéma stocké dans la mémoire à long-terme augmente la charge cognitive nécessaire pour utiliser la seconde modalité (Khalil et al., 2005) et fait paraître cette seconde carte plus difficile. Par ailleurs, la seconde série de questions possédait un niveau moyen de complexité plus élevé, ce qui peut également faire paraître la carte testée en second moins utilisable.

La note d'utilisabilité se dégrade le plus dans le cas où la carte interactive a été testée en 1^{er} et la carte dynamique en 2nde. Cela semble confirmer que la carte dynamique est plus complexe à utiliser.

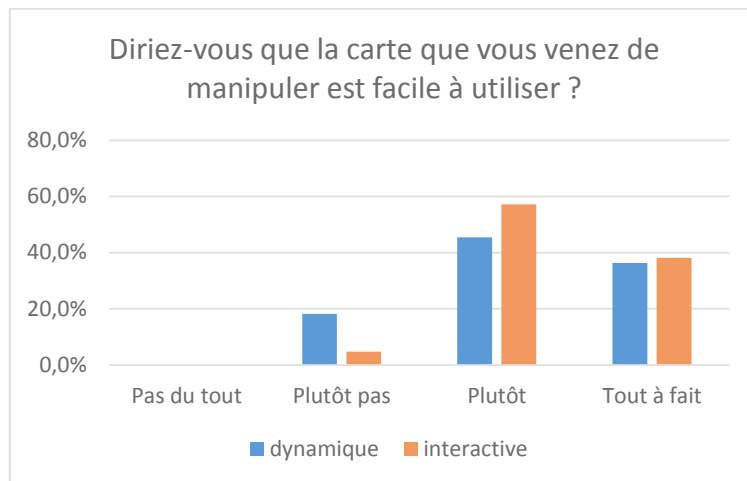


Figure 4.42. Ressenti des utilisateurs sur la facilité d'utilisation, selon la modalité de carte utilisée

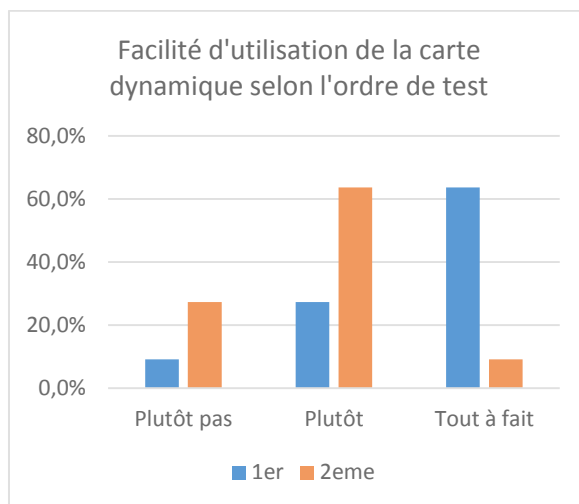


Figure 4.43. Influence de l'ordre de test sur l'évaluation de la carte dynamique

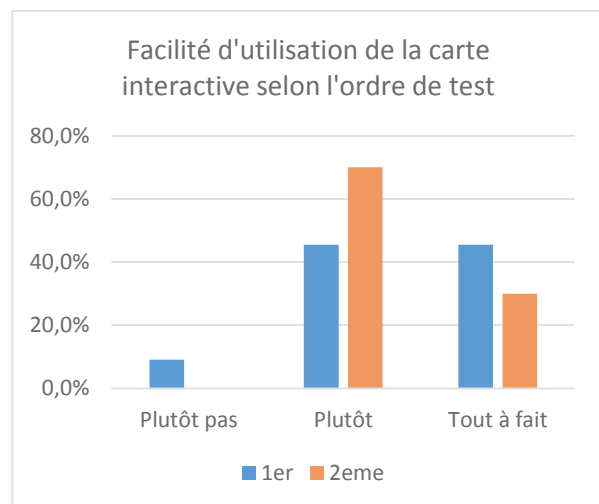


Figure 4.44. Influence de l'ordre de test sur l'évaluation de la carte interactive

Le questionnaire SUS permet de produire des notes d'utilisabilité globale de l'application. La moyenne des notes obtenues est de 78,9%, ce qui est un score assez élevé (équivalent à 15,8/20 dans le système de notation français). La note maximale est de 92,5%, la note minimale de 57,5%. La série des scores est relativement symétrique par rapport à la moyenne (Figure 4.45).

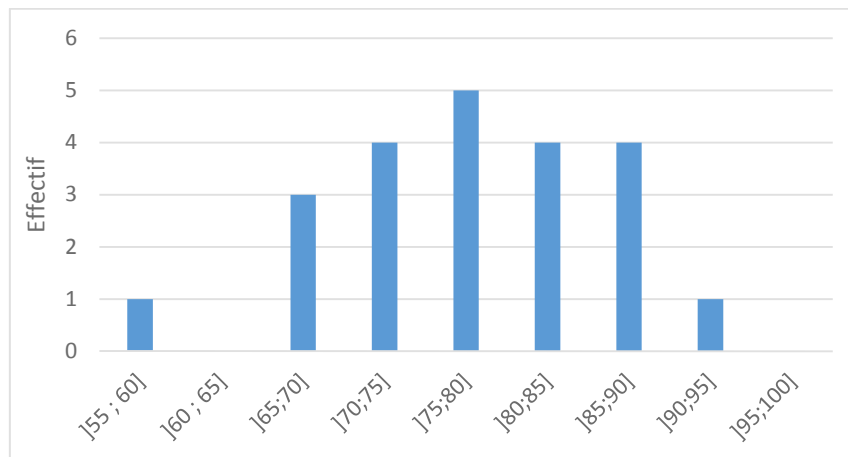


Figure 4.45. Répartition des notes de l'interface de géovisualisation obtenues grâce au questionnaire SUS (noté sur 100)

Il n'y a pas de relation entre la note donnée à l'application et les caractéristiques démographiques des participants, ni avec leur aisance sur les différents thèmes questionnés. Il n'y a pas non plus de relation entre la note SUS d'un participant et son taux de bonnes réponses, ses durées de réponse, ses écarts aux nombres de clics optimaux ou ses durées avant le premier clic. L'avis des participants sur l'application semble donc être indépendant de leurs résultats au test. Il n'y a pas non plus de relation entre les notes données et la modalité de carte testée en premier, bien que la variabilité des notes soit légèrement plus élevée lorsque la carte dynamique a été testée en premier que pour la carte interactive (écart-type de 9,9 contre 6,6), ce qui indique que les avis sur l'utilisabilité de la carte dynamique sont un peu plus mitigés.

2.4.2. Modalité de carte préférée

Les résultats montrent que la carte interactive a été préférée par les participants par rapport à la carte dynamique. 67% des participants ont préféré la carte dans sa version interactive et 33% ont préféré la version dynamique. L'ordre de test joue là encore un grand rôle : la majorité des participants préfèrent la carte qu'ils ont testée en premier (Figure 4.46).

Bien qu'ils aient voté pour une modalité préférée, 29% des participants ont affirmé que les deux modes de visualisation n'étaient pas concurrents mais permettaient en fait d'atteindre des objectifs différents. Ce résultat va dans le sens des résultats obtenus dans des études précédentes (Boyandin et al., 2012; Slocum et al., 2004).

Ces participants s'accordent à dire que la carte dynamique permet de découvrir plus facilement la chronologie globale de l'inondation, alors que la carte interactive, plus synthétique, est plus efficace pour trouver rapidement une information précise recherchée.

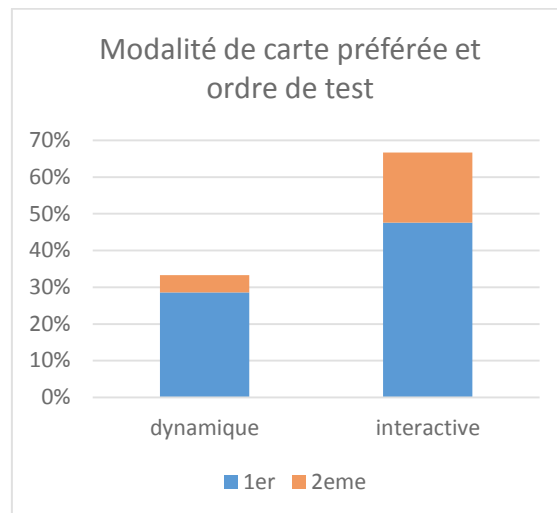


Figure 4.46. Pourcentage de participants préférant chaque modalité de carte, en fonction de l'ordre de test de cette modalité

La phase 2 de l'expérimentation nous a donc permis de confronter la représentation cartographique des causalités à nos utilisateurs et de comparer les modalités de cartes interactives et animées. Les résultats principaux que nous avons obtenu, au regard de nos hypothèses préalables, sont que :

- l'interface est utilisable pour retrouver et collecter des informations ;
- il est difficile de lire les relations de causalités reliant les symboles d'événements ;
- la carte interactive est plus efficace pour les experts thématiques que la carte dynamique.

Ces informations permettent d'invalider notre hypothèse de départ (cf. section VII.1.1), mais elles ne témoignent pas de la façon dont la carte s'intègre dans l'interface de géovisualisation, plus large, et comment les utilisateurs se l'approprient. La phase 3 visait à analyser ces comportements d'usage de l'interface, dans un scénario métier plus réaliste.

2.5. Stratégie d'utilisation lors de la tâche complexe

Compte tenu de la longueur de l'expérimentation, seuls 10 participants ont pris le temps de répondre à la tâche complexe. Etant donné ce nombre relativement faible, les résultats se bornent à des analyses qualitatives qui ne peuvent que montrer des tendances. Celles-ci nécessiteront d'être vérifiées lors de travaux ultérieurs.

La tâche complexe correspondait à un scénario d'utilisation de l'application dans lesquels les participants étaient plus libres de leur usage de l'interface et de leurs réponses. Faisant suite à la passation des tâches élémentaires, qui leur permettait de se familiariser avec l'application, la tâche complexe a été remplie avec la modalité de carte préférée par chaque utilisateur. Cette phase avait deux objectifs :

- identifier quelles fonctionnalités sont les plus utilisées, qui correspondraient aux

- fonctionnalités préférées, jugées les plus utiles ou les plus simples d'utilisation, et
- savoir si l'application est efficace pour remplir une tâche correspondant à un cas plus proche de la réalité.

2.5.1. Fonctionnalités les plus utilisées

A partir des traces d'utilisation, on remarque que tous les participants ont interagi avec la carte pour répondre à la tâche complexe. 7 participants (70%) ont interagi avec la ligne de temps. La ligne de temps la plus utilisée est la ligne de temps synthétique, mais deux participants ont majoritairement utilisé la ligne de temps détaillée sous forme régulière et un la ligne de temps proportionnelle aux événements.

La carte est plus utilisée que la ligne de temps, probablement car elle est la seule à contenir l'information sur la localisation des événements, tandis que l'information sur la date est contenue dans les deux modules. Un participant a également déclaré qu'il n'avait pas utilisé la ligne de temps car il préférerait les cartes aux graphiques. Cela laisse supposer que les différences dans les modules les plus utilisés correspondent aussi aux préférences ou aux habitudes des experts.

Les participants pensent que les quatre modules qu'ils ont le plus utilisé sont, dans cet ordre (Figure 4.47) :

- la carte,
- la fenêtre de description,
- la ligne de temps et
- la légende des symboles.

Les trois modules jugés les plus utilisés sont donc ceux relatifs aux trois dimensions de l'information spatio-temporelle. Lors de l'analyse des traces d'utilisation, on remarque que la fenêtre de description et la légende des symboles n'apparaissent pas beaucoup dans les interactions, alors que les participants disent beaucoup les utiliser. Cela vient du fait que ces modules ne nécessitent pas de clics pour être utilisés. Il s'agit donc d'une limite des traces d'utilisations : elles ne permettent pas d'observer l'usage des modules ne nécessitant pas d'interactions. D'autres méthodes, telles que l'oculométrie, pourraient pallier cette limite.

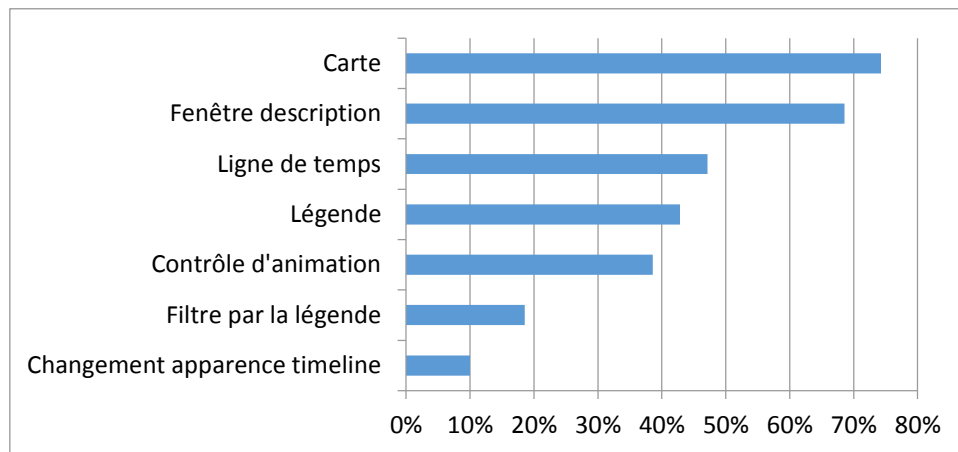


Figure 4.47. Classement des modules de l'interface jugés les plus utilisés (note calculée en fonction de leur position de classement par chaque participant)

2.5.2. Stratégies d'exploration

Parmi les répondants à la tâche complexe, cinq participants ont utilisé la carte interactive (qu'ils avaient indiqué préférer, suite aux tâches élémentaires) et cinq la carte dynamique. Deux des participants ayant préféré la carte interactive ont dit être déçus de ne pas pouvoir utiliser la carte dynamique qui leur semblait plus adaptée pour compléter cette tâche, car elle permettrait de prendre connaissance plus facilement du récit général des événements.

Les analyses qualitatives ont cependant montrées que la modalité de carte n'a pas d'influence sur les réponses produites.

L'analyse des interactions pour répondre à la tâche complexe a révélé quatre types de comportements :

- Groupe 1 : trois participants (30%) commencent par utiliser l'entrée temporelle pour prendre connaissance du récit des événements, par la ligne de temps synthétique ou l'animation, puis, dans un deuxième temps, utilisent presque uniquement la vue cartographique pour accéder au détail des événements.
- Groupe 2 : deux participants (20%) utilisent préférentiellement la ligne de temps détaillée des événements et n'utilisent la carte que pour localiser les incidents dans l'espace (groupe 2).
- Groupe 3 : trois participants (30%) alternent entre usage de la carte et usage de la ligne de temps ou de l'animation (selon le cas animé ou non), ce qui correspond à une prise de connaissance des événements date par date, dans l'ordre chronologique.
- Groupe 4 : deux participants (20%) utilisent uniquement la carte et le filtre par la légende. Ces deux participants employaient la carte interactive.

Ces comportements peuvent être interprétés et généralisés en trois grandes stratégies de lecture du récit :

- selon la première stratégie, la ligne de temps synthétique supporte un niveau de

lecture global du récit et la carte un niveau plus détaillé lors des jours où de nombreux événements se produisent (complémentarité entre entrées synthétiques et détaillées) (groupe 1 et 2),

- dans la seconde stratégie, l'entrée temporelle sert à segmenter l'exploration à l'intérieur de la carte (la ligne de temps a une fonction de support de la carte, qui reste le module principal utilisé) (groupe 3),
- dans la troisième stratégie, la carte est le seul module utilisé et la dimension temporelle est portée par la sémiologie et les lignes de causalité (groupe 4).

Les lignes de causalité ont été utilisées par trois participants, employant tous la carte interactive, pour suivre et explorer le récit des phénomènes naturels, au moins jusqu'à ce que ces liens deviennent trop nombreux (i.e. à partir des dates où surviennent de nombreux dommages).

On demandait ensuite aux participants s'ils souhaiteraient modifier leur stratégie s'ils devaient accomplir à nouveau cet exercice. Les deux participants du groupe 2 et un participant du groupe 1 ont répondu qu'ils utiliseraient plutôt une entrée chronologique par la ligne de temps ou l'animation, en combinaison avec la carte, ce qui se rapprocherait de la stratégie du groupe 3. Un participant du groupe 4 souhaiterait ajouter un peu plus d'informations temporelles dans sa synthèse, sans spécifier toutefois par quel moyen il l'obtiendrait.

Selon le retour d'expérience des participants, la stratégie la plus populaire pour explorer le récit des événements grâce à l'interface serait celle du groupe 3, plébiscitée par 6 participants sur 10 : l'exploration de la carte est guidée par la ligne de temps, en filtrant les événements par dates successives.

Nous avons cherché à déterminer si cette stratégie apparemment préférée par les participants est réellement la plus efficace pour renseigner la plus grande quantité d'informations en un temps limité.

2.5.3. Nature des informations synthétisées

La synthèse du récit de l'inondation pouvait être réalisée en remplissant quatre champs de réponses, relatifs à quatre types d'événements : les phénomènes naturels, les incidents, les travaux et les mesures de gestion des circulations. Les participants se sont tous inspirés de ces catégories pour produire leur synthèse du récit. Il est donc possible de faire une analyse qualitative des réponses sur la base de cette classification.

Dans les 15 minutes imposées, durée identifiée comme trop courte pour finir l'exercice, seuls deux participants sur dix ont eu le temps de décrire les quatre types d'informations proposés. Tous les participants ont décrit les phénomènes naturels et les incidents, c'est-à-dire les types d'événement qui viennent en premier dans la chronologie du récit. 60% des

participants (6 sur 10) ont décrit les travaux, dont la moitié ne les ont abordé que très brièvement. 40% des participants ont décrit les actions de régulation des circulations ; il s'agissait uniquement de participants appartenant aux groupes 1 et 3, ce qui est exploré plus avant ci-dessous. 30% des participants ont décrit la chaîne de causalités entre les phénomènes naturels, ce qui paraît constituer un élément capital du récit car c'est cet effet domino qui conduit à l'ampleur catastrophique de l'inondation. La modalité de carte employée n'a pas d'influence sur les réponses produites.

Les participants des groupes de stratégie 1 et 3 sont ceux qui ont décrit le plus de types d'information différents (en moyenne, 3 types sur 4). Cependant, le nombre d'informations renseigné par les membres du groupe 3 est plus hétérogène que pour les autres groupes.

Les stratégies les plus efficaces, en termes de ressources minimales dépensées pour atteindre l'objectif fixé, sont donc celles des groupes 1 et 3. La stratégie du groupe 3 aboutit à des résultats plus hétérogènes selon les individus.

En revanche, les groupes 1 et 3 ont décrit les informations avec un niveau de détail bien moins élevé que pour les groupes 2 et 4 (voir exemples dans le Tableau 4.4).

On peut donc poser l'hypothèse que les stratégies utilisées par les groupes 2 et 4 favorisent une lecture à un grand niveau de détail mais plus lentement, tandis que les stratégies des groupes 1 et 3 sont plus adaptées à une prise de connaissance du récit à un niveau plus global et plus rapidement.

Tableau 4.4. Exemples de réponses de participants illustrant les différences dans le niveau de détail traité

Groupe d'appartenance	Réponse à la tâche complexe
Groupe 1 (niveau de détail faible)	30 début de la crue 31 maximum de la crue – Pont sur la Moselle, baraquement/cité de chantier submerge Voie non submerge Fissure sur les remblais Glissement au pk 158.1 Dégâts sur OAs 1.66m d'eau gare des voyageurs Metz, 30 cm Gare de Chambière – Travaux sur OA entre le 31/12 et le 6/01 Demande de la mairie vient bousculer les travaux remise en état Une voie rétablie sur le pont de Chambière ouvrage qui était en travaux
Groupe 4 (niveau de détail élevé)	19/12 : 50 cm de neige 25/12 : Début des précipitations 28/12 : redoux causant la fonte des neiges, la Moselle gonfle 29 : inondation de la vallée, inondation de Metz 30 : 8,9m à Metz

	<p>31 : max au pied des talus</p> <p>-- fissures et glissements au Km 158,1</p> <p>Pont de Metz Nord sur la RN 53 Km 158,398 : affouillement sous fondations, demi culée renversée, tablier affaissé, Camion noyé sous le pont</p> <p>gare : eau dans le BV Pk 458, 464</p> <p>pont du Km 158,660 demi culée renversée suite à affouillements installations de chantier du pont sur la Moselle emportées</p> <p>Gare Chambières sous l'eau</p> <p>-- Pont du 158 660 : Dépose du tablier, tablier provisoire, proposition de la mairie d'agrandir, devis pour reconstruction à l'identique, approbation du plan</p> <p>Pont de Metz-Nord : consolidation du tablier, déblaiement des ferrailles, tablier V1 déplacé, reconstruction des culées (ville de Metz voulait agrandir)</p> <p>remblai rien</p>
--	---

2.5.4. *Limites de ces observations*

Il est possible que les stratégies analysées à partir de cette tâche complexe ne correspondent pas au comportement réel que les utilisateurs auraient dans leur métier. Trois limites ont notamment été identifiées.

Premièrement, il paraît clair que les quatre champs proposés pour aider les réponses ont influencé les stratégies mises en œuvre. Ces champs, segmentés par type d'événement, peuvent avoir promu d'une part, le recours à la ligne de temps et à l'animation pour explorer les phénomènes naturels, le champ de réponse s'intitulant « chronologie des phénomènes naturels », et d'autre part, le recours à la carte pour explorer les dommages, car le champ était intitulé : « nature et localisation des incidents ». Ces intitulés ont pu jouer un rôle d'autant plus grand que les participants s'étaient habitués à se conformer avec précision aux intitulés des questions lors de la phase des tâches élémentaires.

Deuxièmement, le temps limité a pu jouer un rôle dans la façon de répondre des participants. L'observation en cours de session a permis de remarquer des méthodes de réponses variées : trois participants prennent connaissance de l'ensemble du récit des événements (sur la totalité ou par parties du récit) avant de renseigner les champs de réponse ; cinq participants parcourent tous les événements un par un de façon systématique et copient le contenu des descriptions dans les champs de réponse ; enfin, deux participants enregistrent tous les événements d'un même type via la fonction « conserver l'historique » avant d'en prendre connaissance et d'en produire une synthèse. La première méthode semble réserver un premier temps à la compréhension du récit avant d'en construire une synthèse, tandis que les deux dernières semblent plus mécaniques et possiblement guidées par le temps limité. Notons que l'usage d'une méthode de réponse n'est pas corrélé à l'usage

d'une stratégie d'exploration du récit parmi celles décrites dans la section VII.2.5.2.

Troisièmement, deux participants ont commenté que le cas d'étude proposé ne correspondait pas réellement à une tâche métier, car les experts ont rarement besoin de rédiger des synthèses à un « niveau de détail aussi poussé » que ce que l'énoncé de la tâche suggérait.

L'analyse de cette tâche complexe s'avère donc intéressante pour comprendre l'articulation entre les différents modules de l'interface, mais il n'est pas exclu que d'autres comportements que ceux observés apparaissent dans un cas d'usage réel.

2.6. Retours utilisateurs sur l'interface de géovisualisation

Durant la phase des tâches élémentaires, après avoir testé chaque modalité de carte, les participants ont été interrogés sur les points positifs et négatifs de l'application, sous forme de questions ouvertes. Leur avis a porté sur la navigation dans l'interface, sur les représentations graphiques et cartographiques et sur l'accès aux descriptions des événements. Les 22 participants ont répondu à ce questionnaire.

Ces avis ont été complétés par un questionnaire directif situé tout à la fin du test, dans lequel les participants exprimaient leur accord avec une série d'affirmations sur une échelle à 4 niveaux (de « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord »). 19 participants ont répondu à ce questionnaire final.

2.6.1. Organisation générale et navigation

Concernant la navigation dans l'interface, les participants ont émis des avis positifs sur la fluidité et la liberté de la navigation dans l'application et sur l'esthétique de l'interface.

4 participants sur 22 (18%) ont cité spontanément comme un atout le fait d'avoir une vue géographique des données, sous forme de carte, ce qui n'est pas le cas dans les outils de capitalisation historique actuellement employés dans leur métier. 7 participants (32%) ont exprimé comme un point positif le fait que la carte donne une vue globale et synthétique du récit de l'inondation, que ce soit après avoir manipulé la carte non animée (3 participants) ou animée (4 participants). Les participants citent aussi spontanément comme un point positif d'avoir une vue synchronisée de l'espace et du temps (exprimé par 5 participants sur 22, soit 23%).

Six participants (27%) citent comme point négatif que la carte contient trop d'informations, dont 4 qui l'ont exprimé en utilisant la carte animée et 2 avec la carte interactive.

Nos propositions de représentation et d'interactivité ne semblent donc pas suffisantes pour résoudre le problème de la grande densité en événements dans l'emprise de la carte.

Ce point est soulevé en moyenne plutôt par les participants qui ont une expertise thématique et cartographique : ces participants étudient très souvent les inondations et les événements anciens, ont une compétence en hydrologie ou hydraulique et estiment avoir l'habitude d'utiliser des cartes et des sources de données informatisées très souvent. Leur plus grande habitude d'être confrontés aux cartes et aux données d'inondations peut expliquer qu'ils soient plus critiques vis-à-vis de la forme graphique de ces données. Ils ont peut-être également une idée plus précise que les autres de ce qu'ils attendent d'une application de géovisualisation.

Par ailleurs, deux autres participants ont exprimé que la carte interactive leur donnait un sentiment de contrôle plus grand sur les données que la carte dynamique. Une hypothèse explicative est que l'affichage des relations de causalité au fil de l'animation, plutôt que sur demande interactive, peut alourdir la quantité d'informations perçue dans la carte dynamique.

Les participants ont par ailleurs ciblé deux problèmes d'ergonomie dans les contrôles de l'animation :

- premièrement, le fait de ne pas pouvoir cliquer à une date dans la ligne de temps pour accéder directement à cette date,
- deuxièmement, le fait que les boutons lecture et pause ne changent pas d'apparence lors du clic, pour montrer si l'animation est en cours de lecture ou non.

Concernant le premier point, pouvoir cliquer sur le graphique temporel pour naviguer jusqu'à une date choisie est un standard de fait, existant dans les lecteurs multimédia actuels. Notre application ne propose que deux boutons pour naviguer vers la scène précédente ou la scène suivante. Le ciblage d'une scène éloignée de la date en cours de lecture aboutit alors à des interactions répétées avec la même fonctionnalité, ce qui engendre une charge cognitive superflue.

Concernant le non-changement d'apparence des boutons lecture et pause, il manque ici un feedback de la part de l'interface, indiquant aux participants que leur demande a bien été prise en compte. L'animation se déroulant à une vitesse constante, relativement lente pour les scènes où peu d'événements surviennent, les traces d'utilisation montrent que plusieurs participants lançaient l'animation lors d'une question et la mettaient en pause seulement après avoir pris connaissance de la question suivante.

27% des participants citent la légende des symboles comme un point positif de l'interface, la jugeant facile à lire. 3 participants ont cité comme un point très positif les symboles iconiques représentant les incidents, mais n'apprécient pas les symboles abstraits

représentant les travaux, les mesures de réaction ou les actions sur les circulations. Ils suggèrent d'utiliser des symboles iconiques également pour ces catégories.

Au total, d'après le questionnaire directif, 47% des participants trouvent que les symboles évocateurs des composants ferroviaires sont tout à fait compréhensible sans avoir recours à la légende, 26% sont plutôt d'accord, l'un précisant qu'il faut quand même un temps de compréhension et de mémorisation. 26% ne sont plutôt pas d'accord avec cette affirmation sur les symboles iconiques mais n'ont pas explicité les raisons de leur réponse.

La majorité des participants valident donc l'usage de symboles iconiques pour représenter les types d'événements.

Les participants sont 63% à trouver qu'il est plutôt utile ou tout à fait utile de pouvoir condenser ou dilater les couleurs de la légende sur demande. Cette fonction n'a cependant été utilisée que par 3 participants parmi les 19 répondants (i.e. 16% des participants) durant le test.

Le questionnaire directif montre aussi que 53% des participants trouvent les cases de filtre dans la légende tout à fait utiles. 42% les jugent plutôt utiles, mais l'utilité est ici mélangée avec l'ergonomie, car un participant justifie sa réponse mitigé par le fait qu'il manque une fonction pour sélectionner ou désélectionner toutes les cases à la fois. C'est en effet une fonction classique de ce type d'interface de filtre, qui n'avait pas été implémentée dans l'application avant le test. Enfin, un participant n'est plutôt pas d'accord sur l'utilité de ces filtres, après les avoir testés lors d'une tâche élémentaire.

2.6.2. Visualisation de l'espace

Quatre participants ont cité comme un point positif le fait d'ordonner les symboles verticalement à leur point d'apparition, témoignant que cela permet de lire facilement la chronologie des événements sur un ouvrage donné. Le questionnaire directif final révèle que cet empilement graphique est jugé tout à fait compréhensible par 79% des participants et plutôt compréhensible par 15,8% des participants. Seul un participant trouve que ce mode d'affichage n'est plutôt pas compréhensible.

Le fait que de nombreux événements survenus au même endroit soient dispersés dans plusieurs rectangles est jugé légèrement moins positivement : 42% des participants trouvent cela tout à fait compréhensible et 53% des participants le trouve plutôt compréhensible. De nouveau, 1 participant n'est plutôt pas d'accord. Il ne s'agit pas du même participant que la question précédente.

La pile chronologique des symboles est donc compréhensible et lisible pour les utilisateurs. Cependant, lorsque le nombre de symboles d'événements est élevé, ce mode de représentation est moins approuvé et montre ses limites.

74% des participants trouvent qu'il est tout à fait utile d'afficher une photo aérienne de la zone en fond de carte et 21% trouvent cela plutôt utile. Un participant trouve que ce fond de carte n'est plutôt pas utile et aurait souhaité avoir d'autres choix, par exemple une carte topographique ou le relief du terrain. En revanche, le fond de carte schématique uni est jugé tout à fait à plutôt utile seulement par 58% des participants. Il n'a été employé que par un seul des participants au cours du test.

2.6.3. Visualisation du temps

32% des participants (7) citent spontanément comme point positif que la carte donne une bonne vue de la chronologie des événements et du récit, ce qui a été majoritairement exprimé juste après l'usage de la carte animée (6 voix) par rapport à la carte statique (1 voix).

Le questionnaire directif a révélé que seulement 58% des participants trouvent qu'il est tout à fait facile d'identifier la date d'un événement. 32% trouve que cela est plutôt facile et 2 participants trouvent que c'est plutôt difficile. L'observation des participants montre que les deux qui ont répondu « plutôt difficile » ont eu des difficultés à comprendre la synchronisation entre les sélections dans la ligne de temps et dans la carte.

A propos des modalités de représentation de la date, 79% des participants trouvent qu'il est tout à fait intéressant d'utiliser des teintes différentes pour figurer la date des événements. 16% des participants sont plutôt d'accord. Un participant n'est plutôt pas d'accord sur l'emploi de cette variable car il pense que la couleur rouge peut être associée à un phénomène dangereux, ce qui risque de biaiser la lecture si le lecteur ne se réfère pas correctement à la légende. En effet, ce participant est habitué dans son métier à produire et à utiliser des cartes dans lesquelles la couleur rouge est utilisée (à bon escient) pour refléter le degré de gravité des dommages sur le réseau ferré.

Par ailleurs, deux participants (dont le dernier sus-cité) ont trouvé difficile de comprendre l'association de palettes de couleurs avec les périodes hydrologiques de "crue" et "décru" ; ils trouvent confus de mélanger les dates avec les phénomènes naturels, qui sont par ailleurs représentés sous forme ponctuelle par une catégorie de symboles. Cela révèle une ambiguïté au niveau sémantique entre le contexte temporel (ex : « la période de crue ») et les événements remarquables cartographiés (ex : « la rivière en crue »). Peut-être cette incompréhension est-elle aussi liée à notre parti pris de formaliser les intervalles temporels (« période de montée des eaux ») par des dates ponctuelles (événement « début de la crue » puis « début de la décrue » puis « fin de la décrue »).

Autrement, 57% des participants trouvent qu'il est tout à fait utile de distinguer les phases de l'inondation par des teintes différentes, tandis que 26% trouvent cela plutôt utile. Plusieurs participants, notamment parmi les hydrologues, ont suggéré d'associer également un graphique montrant la cinétique du niveau du cours d'eau grâce à une courbe surimposée à la ligne de temps. Cela pourrait permettre de mettre en relation la hauteur et la vitesse de

montée des eaux avec les dommages.

L'usage de la teinte et de l'intensité de la couleur est adapté aux experts pour lire les dates d'événements. La segmentation des teintes par période phénoménologique, ainsi que le choix des couleurs utilisées, sont d'avantage sujet à discussion et devraient être réétudiés en concertation avec les experts.

Concernant les graphiques de lignes de temps, les avis sont globalement positifs, même si les niveaux d'interaction avec la ligne de temps sont variés. Tous les participants ont interagi avec la ligne de temps, mais 38% l'ont très peu utilisée (moins de 5% du nombre total de leurs interactions). 3 participants sur 21 (14%) ont même interagi d'avantage avec la ligne de temps qu'avec la carte. 43% des participants ont utilisé les deux vues dans des proportions équivalentes.

La ligne de temps synthétique, qui montre le nombre total d'événements par jour, a été la plus utilisée : seulement un tiers des participants a modifié l'affichage de la ligne de temps pour passer à la ligne de temps détaillée. Ces participants n'ont pas eu de résultats significativement meilleurs que ceux qui ne l'ont pas utilisée. Deux participants pensent que les menus de changement d'affichage de la ligne de temps sont mal placés dans l'interface et qu'ils devraient se trouver plus proches de la ligne de temps. Cela peut expliquer en partie que ces contrôles aient été peu utilisés.

5 participants (23%) ont cité spontanément la ligne de temps synthétique comme un atout de l'interface, que ce soit en association avec la carte animée ou non animée.

Un participant a beaucoup apprécié et utilisé la ligne de temps proportionnelle aux événements et la cite comme un point positif de l'interface. Il déclare que cette ligne de temps proportionnelle serait suffisante pour répondre aux questions, sans interagir avec la carte, si les couleurs des symboles représentaient les localisations plutôt que la date (Figure 4.48).

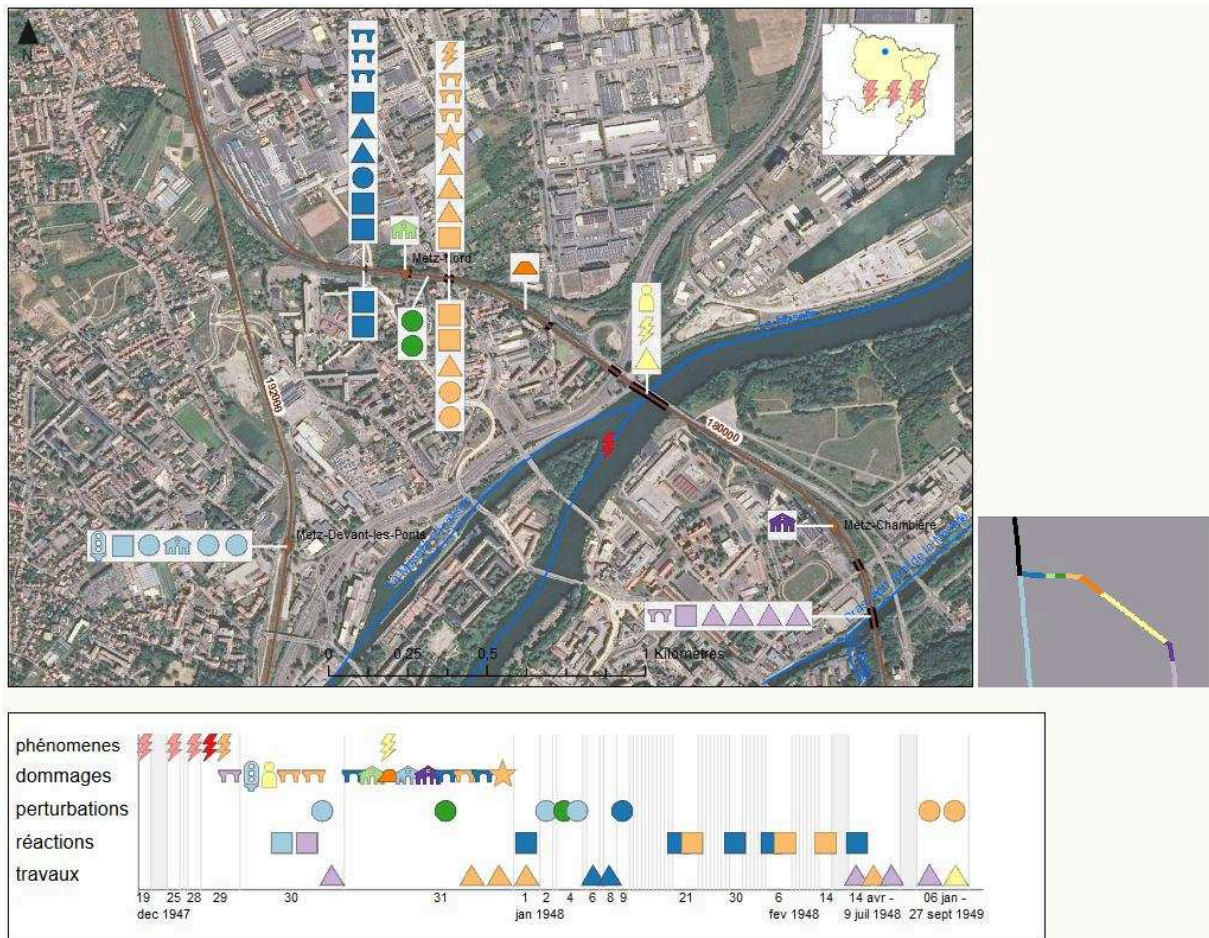


Figure 4.48. Mise en carte de la proposition d'un participant d'associer la couleur à la localisation spatiale plutôt qu'à la date

D'après le questionnaire directif, 79% des participants pensent qu'il est plutôt à tout à fait utile de pouvoir passer d'une ligne de temps régulière et une détaillée. 16% des participants trouvent que cela n'est plutôt pas à pas du tout utile et 1 participant ne se prononce pas. Pour expliquer sa réponse négative, un participant déclare que la ligne de temps proportionnelle aux événements est plus utile que la régulière. Deux participants disent que le niveau de granularité des lignes de temps détaillées, fixé au jour, n'est pas assez fin sur la période qui couvre la durée de la crue.

La ligne de temps est donc utilisable par les experts en association avec la carte. Environ un tiers des participants l'utilisent très peu. Cela pourrait s'expliquer par des préférences personnelles ou un manque d'habitude d'usage des interfaces multi-vues.

Parmi les lignes de temps détaillées, les participants semblent préférer la ligne de temps proportionnelle aux événements.

Enfin, le questionnaire directif révèle que 58% des participants pensent que la ligne de temps synthétique est plutôt à tout à fait adaptée pour accéder au résumé des événements par jour. Deux participants pensent que ce n'est plutôt pas à pas du tout une bonne entrée pour

lire les résumés par jour, malgré le fait qu'ils aient beaucoup interagi avec les lignes de temps. L'un des deux justifie sa réponse négative en disant qu'il préférerait que ces descriptions soient consultables dans la ligne de temps détaillée au lieu de la ligne de temps synthétique. Au moins deux autres participants qui ont répondu « plutôt oui » ont suggéré que le résumé des événements par jour apparaisse automatiquement au fil de l'animation, lors du défilement animé du récit.

Les participants semblent donc considérer qu'une description résumée des événements par jour est très utile pour suivre le récit. Cependant, celle-ci serait peut-être plus efficace si elle apparaissait automatiquement au fil de l'animation plutôt que lors du clic sur la ligne de temps synthétique.

2.6.4. Visualisation des descriptions des événements

6 participants (27%) ont spontanément exprimé comme un point positif de pouvoir accéder à plus d'information sur les événements lors du clic. Cependant, 2 participants ont exprimé leur désaccord avec l'affichage de cette information attributive dans une fenêtre externe à la carte. Ils préféreraient que celle-ci s'affiche plus proche du point cliqué, sous la forme d'une infobulle, ou directement en tant qu'étiquette dans la carte.

Cela rejoint les résultats de travaux en visualisation qui suggéraient que des labels placés proches des objets qu'ils décrivent diminuent la charge cognitive (cf. section IV.2.4.2).

Il faut cependant nuancer cette proposition par le fait que les descriptions d'événement sont longues, ce qui risque d'augmenter la charge graphique de la carte.

La fonction de conservation de l'historique des événements cliqués n'a convaincu que 37% des participants, qui pensent qu'elle est pleinement satisfaisante. 37% autres pensent qu'elle est plutôt satisfaisante mais devrait être améliorée. Ils proposent par exemple de permettre d'exporter les descriptions sélectionnées sous forme de rapport en pdf, d'afficher les liens de causes et conséquences entre les événements dans la fenêtre d'historique ou encore de permettre de conserver plusieurs historiques dans des fenêtres parallèles. 10% des participants pensent que la fonction de conservation de l'historique n'est plutôt pas à pas du tout satisfaisante et trois participants ne se prononcent pas car ils ne l'ont pas utilisée.

Le suivi de la succession d'événements proposé par notre interface n'est donc pas optimal. Les liens entre vue cartographique et vue attributive devraient être approfondis pour faciliter la lecture des causalités, ce qui serait peut-être possible en représentant les relations de causalité dans la fenêtre des descriptions d'événements, comme l'a suggéré un participant.

3. Synthèse et discussion des résultats

3.1. Une représentation des effets dominos améliorable

Les résultats de cette expérimentation nous amènent à conclure que les deux modalités d'interface proposées permettent de récupérer l'information, mais qu'il est difficile pour les participants d'y lire les relations de causalités. La méthode de représentation des relations de causalités que nous proposons devrait donc être améliorée, de façon à lire plus facilement les processus complexes que sont les effets dominos. Deux facteurs principaux ont été identifiés, qui sont susceptibles d'expliquer les problèmes de lecture rencontrés par les participants.

Premièrement, il semble qu'il manque une vue d'ensemble sur les relations de causalité.

Dans la représentation actuelle, le lecteur n'a accès qu'à des fragments successifs du processus d'effet dominos. Or une vue d'ensemble pourrait faciliter la compréhension de ce processus et guider l'exploration de l'utilisateur. Une visualisation globale des relations de causalités pourrait consister, lors de la sélection d'un événement, à afficher l'ensemble de la chaîne de causes ayant conduit à lui ou l'ensemble de sa chaîne de conséquences (Figure 4.49). Une autre méthode proposée par quelques participants à l'expérimentation pourrait être l'inclusion d'une nouvelle vue dans l'interface, contenant un graphique en réseau représentant la chaîne de causalité entre les descriptions d'événements (Figure 4.50).

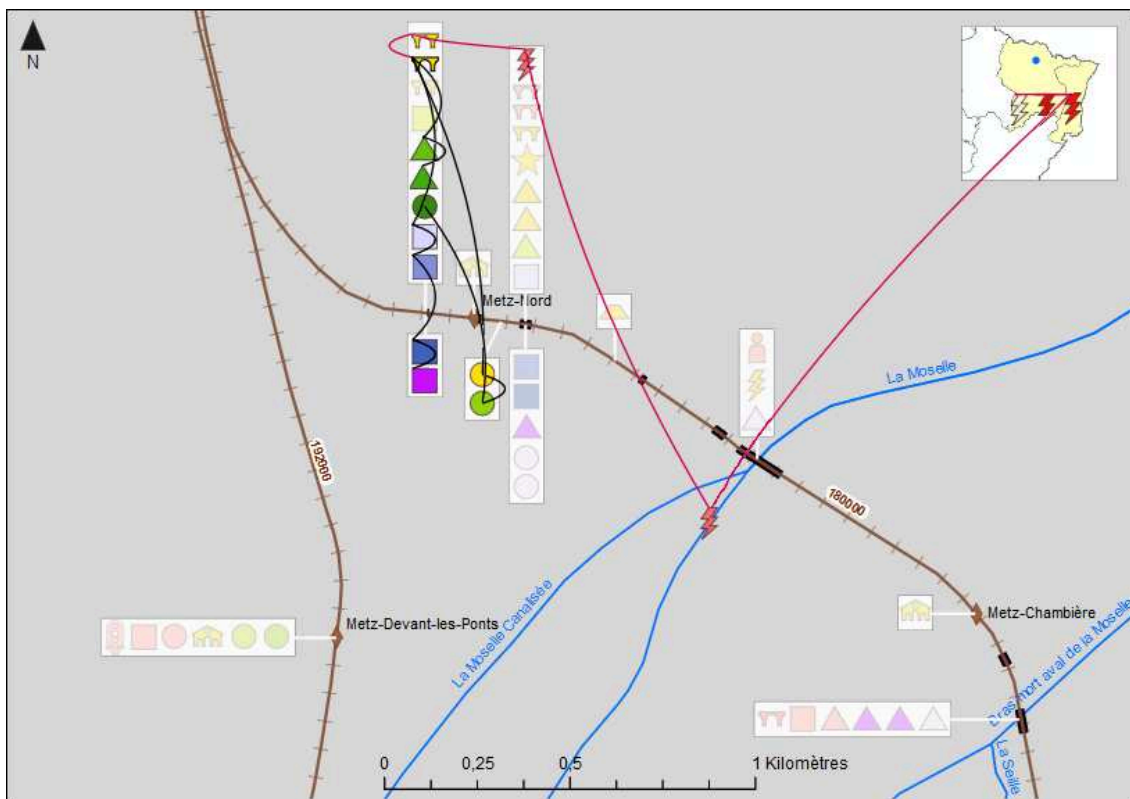


Figure 4.49. Exemple d'affichage dans la carte de l'ensemble de la chaîne de causalité partant et arrivant d'un événement

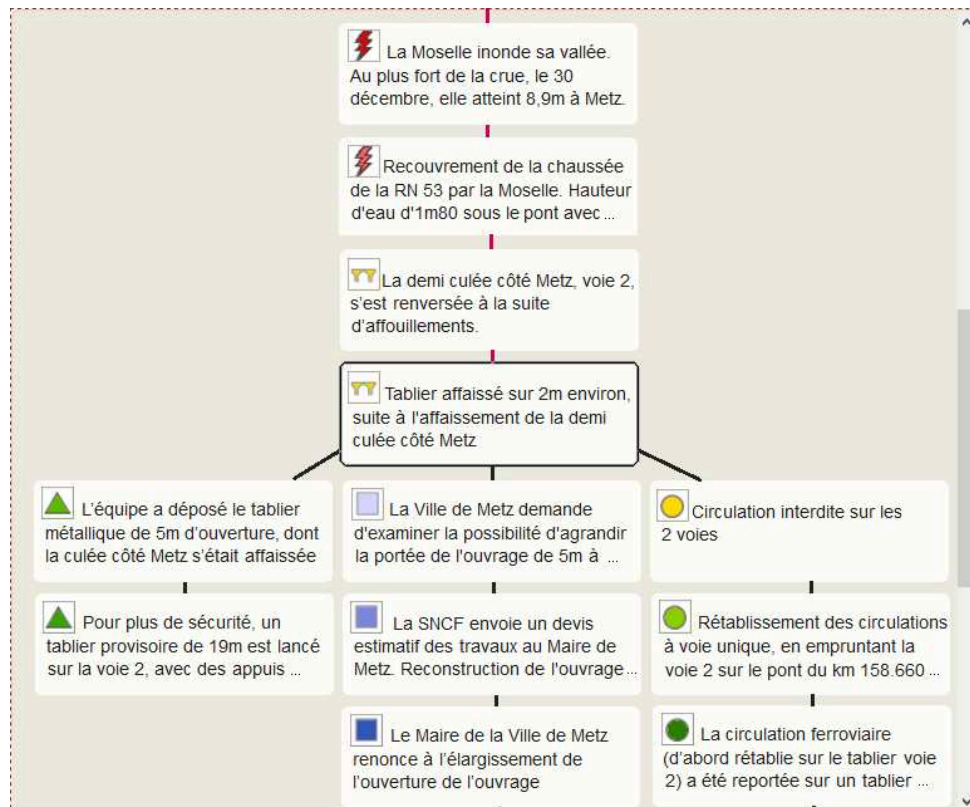


Figure 4.50. Exemple d'un graphique en réseau montrant les relations entre événements du récit, qui pourrait être associé à la carte

Deuxièmement, il semble que les lignes de causalités soient plus faciles à explorer lorsqu'elles peuvent être interrogées sur demande par rapport au cas où elles apparaissent automatiquement au cours de l'animation.

Les stratégies qui donnent le contrôle aux utilisateurs via des outils d'interaction avec l'animation semblent en effet parfois aider à diminuer la charge cognitive extrinsèque et à augmenter la charge cognitive germaine (Khalil et al., 2005).

Ces conclusions sur la lecture des causalités correspondent au cas où les participants réalisent des tâches élémentaires, c'est-à-dire des actions unitaires, non incluses dans une procédure de résolution de problème. Pour prendre connaissance du récit d'une inondation dans son ensemble, tâche qui ressemble d'avantage à un cas réel d'usage, la carte animée est en majorité préférée par les participants, et son usage aboutit à des résultats équivalents à ceux de la carte interactive.

1.1. La carte dynamique est moins efficace que la carte interactive

Notre hypothèse expérimentale était que la carte dynamique serait plus efficace pour lire les relations de causalités que la carte interactive. Cette hypothèse est infirmée par nos résultats : la carte dynamique est légèrement moins efficace que la carte interactive, peut-

être en raison de sa plus grande complexité pour des utilisateurs novices en géovisualisation. Cette différence n'est cependant pas statistiquement significative et ne peut être généralisée au-delà de notre échantillon de participants.

On peut poser l'hypothèse que cette différence entre les deux modalités de carte est due au fait que l'apparition animée des événements augmente à la fois la charge cognitive intrinsèque, car les participants doivent fournir une attention plus soutenue pour observer les changements, et la charge extrinsèque, car la carte dynamique requiert plus d'actions de la part de l'utilisateur en manipulant les contrôles de l'animation. Cette hypothèse est étayée par l'observation d'un effet significatif de fatigue (qui pourrait aussi témoigner d'une lassitude) lors de l'utilisation de la carte dynamique. Cette relative complexité de la carte dynamique créerait notamment une surcharge cognitive lors de la confrontation aux questions les plus complexes.

Les résultats laissent par ailleurs suspecter que l'usage de la carte dynamique limite le nombre total d'interactions avec l'interface et diminue la confiance des participants dans leurs réponses. La cause de ce nombre d'interaction plus faible reste encore à définir.

Comme l'avaient souligné Boyandin et al. (2012), les deux modalités de cartes interactive et dynamique peuvent probablement être utilisées de façon complémentaire.

L'idéal pour notre application serait de combiner les deux modalités, animée et non-animée : selon les participants de notre expérimentation, la carte interactive facilite l'accès à une information spécifique d'intérêt, tandis que la carte dynamique permet de prendre connaissance du récit dans son ensemble. Les combiner offre donc une possibilité de lecture du local au global.

L'efficacité moindre de la carte dynamique doit être nuancée par le fait que les contrôles de l'animation de notre application présentaient deux problèmes d'ergonomie :

- l'impossibilité d'accéder à une date du récit directement en cliquant dans la ligne de temps et
- l'absence de feedback instantané de l'interface lors du lancement ou de l'arrêt de l'animation.

Ces fonctionnalités devraient être présentes dans toute interface de géovisualisation dynamique pour garantir l'utilisabilité de l'animation.

Une autre limite peut également exister dans notre carte animée. D'après Tversky et al. (2002), une grande force des animations est de permettre l'anticipation de la résolution du mouvement ou, en d'autres termes, d'anticiper les scènes suivantes de l'animation. Ce comportement d'anticipation a en effet été observé au cours de notre expérimentation : trois participants ont témoigné avoir tenté d'anticiper l'endroit d'apparition de la conséquence

d'un événement, en l'occurrence un événement de travaux suite à un incident sur le remblai ferroviaire. Mais dans le cas de notre carte, cette conséquence ne se trouvait pas à la même localisation que sa cause. En effet, l'événement de travaux était relatif à une portion linéaire de voie ferrée d'une centaine de mètres car la voie ferrée a été reconstruite dans sa globalité en une seule fois dans ce secteur. L'événement de travaux était donc une conséquence commune à plusieurs incidents et était placé approximativement au milieu de la portion concernée.

Ce constat nous amène à remettre en question la formalisation de nos données, notamment :

- la réduction des événements linéaires ou surfaciques à une localisation ponctuelle et
- la segmentation des dommages et des travaux en événements élémentaires.

Ces deux points ne correspondent peut-être pas aux schémas cognitifs des utilisateurs, ce qui peut freiner la compréhension des relations de causalités.

Il semblerait intéressant de tirer parti de la tendance naturelle de l'être humain à anticiper la fin des mouvements. Néanmoins, la réduction des événements linéaires ou surfaciques sous forme de points et, par voie de conséquence, le fait que les événements conséquences ne soient pas toujours situés au même emplacement que leur cause empêche ce comportement. La segmentation et la méthode de traduction graphique des événements constituant notre récit ne sont donc pas optimales.

Ce constat soulève de nouvelles questions de visualisation : la simplification d'événements linéaires sous une forme ponctuelle est-elle rédhibitoire et devrait-elle alors être évitée ? Les événements de notre récit, tels que segmentés dans l'ontologie, sont-ils sur- ou sous-segmentés ? Est-il possible de faire co-exister graphiquement, de façon lisible, plusieurs événements de géométries différentes, sans générer de confusion sémantique ?

1.2. Une exploration orientée vers la dimension spatiale

Lors de la prise de connaissance du récit, dans la tâche complexe, la ligne de temps est utilisée en coordination avec la carte selon deux méthodes (cf. section VII.2.5.2) :

- soit utiliser la ligne de temps synthétique pour fournir un niveau de lecture global sur le récit avant d'accéder au détail des événements grâce à la carte,
- soit l'utiliser pour segmenter et guider l'exploration dans un ordre chronologique, l'exploration s'effectuant principalement via la carte.

Les participants pensent que la deuxième méthode de lecture du récit, où la ligne de temps a une fonction de support de la lecture cartographique, serait la plus efficace pour créer une synthèse du récit. Par rapport à la première, cette méthode aboutit à une plus grande diversité d'informations relevées par les participants, mais à un niveau de détail

moins dans leur description.

D'après les retours des participants, ce niveau de détail moins semble d'avantage correspondre au niveau de détail requis dans leurs tâches métier. La deuxième stratégie est donc peut-être celle qui correspond le mieux à la prise de connaissance d'un récit cartographique par des experts.

La ligne de temps synthétique, qui fournit un résumé des événements par jour, a été plus largement utilisée que la ligne de temps sous forme détaillée. Plusieurs facteurs explicatifs sont envisageables :

- ce niveau de détail global est peut-être le plus adapté aux besoins des experts du domaine,
- le fait qu'ils aient en majorité l'habitude d'utiliser des cartes mais pas des interfaces de géovisualisation peut faire qu'ils sont moins à l'aise avec la manipulation et le changement d'affichage relatif à la dimension temporelle,
- comme la ligne de temps synthétique était la modalité affichée par défaut, il est simplement possible que les participants n'aient pas pensé à modifier son affichage durant leur navigation. Quelques participants ont d'ailleurs suggéré que le contrôle pour changer l'affichage de la ligne de temps est trop éloigné dans l'interface, ce qui n'engage pas à utiliser cette fonctionnalité. Ils préconisaient de placer ce contrôle à côté de la ligne de temps.

Mais, pour ceux qui l'ont utilisée, la ligne de temps proportionnelle aux événements semble avoir été particulièrement appréciée.

Au final, les résultats tirés de cette expérimentation ont un impact important des questions posées (objectif de la question, dimension interrogée, complexité cognitive), dont l'effet était plus fort que celui de la variable indépendante testée (la modalité de carte). L'analyse de ces résultats nous conduit à souligner un certain nombre de limites attenantes à notre protocole expérimental et des recommandations pour les résoudre.

VIII/ Vers un protocole expérimental standardisé

Comme dans de nombreuses expérimentations en visualisation, des éléments imprévus se sont glissés dans notre protocole expérimental (Tversky et al., 2002), impactant les résultats de certaines analyses. L'identification de ces éléments nous permet d'émettre un retour d'expérience et des recommandations pour éviter de les reproduire dans des expérimentations ultérieures, ce qui est présenté dans la première section.

Ensuite, la conduite de cette expérimentation a été l'occasion de tester certaines originalités mises en œuvre dans le protocole expérimental (cf. section VII.1.2.4) :

- l'apport des traces d'utilisation pour analyser les stratégies d'exploration des utilisateurs,
- l'apport de nouvelles variables dépendantes, extraites des traces d'utilisation, à savoir la durée avant le premier clic et l'écart au nombre de clics optimal.

La deuxième section souligne les apports de ces variables originales et discute notamment de l'intérêt d'étudier les traces d'utilisation en cartographie.

Notre protocole a également permis de tester une interface de géovisualisation dans sa globalité, plutôt que de nous concentrer sur un seul composant de l'interface voire une seule variable, ce qui est communément testé en cartographie car issu des legs en psychologie expérimentale. Ce type de protocole standard n'est cependant pas le plus adapté pour étudier l'utilisabilité d'une interface dans son ensemble, d'où la mise en place de notre propre protocole. Il nous a notamment permis d'étudier les interactions entre l'usage des différentes vues synchronisées.

La troisième section synthétise l'ensemble des résultats obtenus pour proposer un modèle de protocole expérimental standard, adapté au test des interfaces de géovisualisation, ainsi que des recommandations pour l'élaboration de protocoles expérimentaux plus reproductibles en cartographie.

1. Quelques limites de nos analyses

1.1. Caractéristiques des participants

Les résultats des analyses ont révélé qu'il existe une grande variabilité des résultats selon les individus. Cependant, les caractéristiques individuelles observées (caractéristiques démographiques et habitudes de travail) n'ont pas permis d'expliquer ces différences. Quelques-unes de ces caractéristiques n'ont pas pu être testées statistiquement car l'effectif de participants dans chaque catégorie n'était pas suffisant pour pouvoir la corrélérer aux résultats (ex : trop peu d'utilisateurs n'utilisant jamais de logiciels informatiques, aucun n'utilisant jamais de cartes pour trouver des itinéraires, ...). Et parmi les analyses réalisées, seule la familiarité avec le thème des inondations s'est avérée avoir une influence significative sur les résultats.

Il nous semble intéressant d'étudier l'influence d'autres indicateurs individuels sur les résultats d'usage d'applications de géovisualisation. Les caractéristiques démographiques sont les plus souvent testées en cartographie, mais de nombreux autres indicateurs individuels peuvent avoir un effet sur les résultats (cf. section IV.3.2.4).

Dans notre cas, des indicateurs tels que la capacité à se repérer dans l'espace, la capacité de mémoire ou le goût de lire des récits auraient par exemple pu s'avérer intéressants à tester.

Dans un contexte professionnel, les évaluations s'étant déroulées à des horaires variées durant la journée de travail, des indicateurs relatifs au contexte de passation du test pourraient aussi avoir un intérêt, tels que l'état d'esprit au moment de la session ou le degré de fatigue du participant, potentiellement dépendant de l'heure de la journée.

1.2. Limites de l'ordre de test

L'analyse des résultats révèle que la carte testée en 2^{ème} position, quelle que soit sa modalité, est majoritairement jugée plus difficile. Il n'est pas aisé de déterminer si cela vient du changement de modalité de carte en lui-même, qui conduit les participants à remettre en cause le schéma d'utilisation appris grâce à la 1^{ère} modalité de carte, ou bien si ce résultat provient de la nature des questions de lecture des causalités, jugées plus difficiles. Si la baisse de résultat provient du changement de modalité de carte, cela biaise alors les résultats des tâches de lecture des causalités.

Cela nous amène à conclure que le design within-subject, avec changement de modalité de carte pour le même participant, n'est peut-être pas idéal pour tester une interface de géovisualisation complexe. Dans ce cas, un design between-group aurait probablement donné des résultats plus clairs, bien qu'il nécessite un plus grand effectif de participants.

1.3. Possibilité de biais lié à l'anticipation des difficultés des participants

Le déroulement de l'expérimentation se basait sur l'hypothèse implicite que l'application de géovisualisation serait difficile à manipuler par des participants peu habitués à ce type d'interface. Par conséquent, de nombreuses précautions ont été prises dans le protocole pour contrebalancer cet effet de difficulté : l'introduction d'un temps de formation à l'usage de l'interface, laisser le temps aux utilisateurs de se familiariser avant de répondre, proposer plusieurs questions d'entraînement, de familiarisation, etc.

On peut se demander s'il est possible que cette abondance d'explications et d'entraînements ait influencé les résultats finaux.

Deux effets en particulier peuvent être identifiés :

- Est-ce que les participants n'ont pas ressenti qu'on leur présentait une interface très

compliquée, à cause de ce parti pris ? Les commentaires finaux, globalement positifs, et la confiance des participants dans leurs réponses semblent plutôt infirmer cette hypothèse.

- Est-ce qu’intervertir les deux séries de question (recherche d’information et lecture des causalités) aurait réellement conduit à des résultats de lecture des causalités plus mauvais lorsque ces questions auraient été présentées en premier ? Et est-ce que l’effet de fatigue aurait aussi été observé dans la série de questions sur la lecture des causalités ? Il aurait été intéressant d’intervertir l’ordre de ces tâches pour observer le résultat. Dans ce cas de figure, il aurait aussi fallu doubler (ou au moins augmenter) l’effectif de participants, pour éviter que la moitié des résultats ne soient pas interprétables.

1.4. Interprétation délicate de certaines variables quantitatives

Il est difficile d’interpréter certaines variables dépendantes : la durée de réponse peut à la fois refléter une difficulté à répondre, d’où sa corrélation positive avec les réponses fausses, mais elle peut aussi indiquer une ténacité ou une motivation dans la recherche d’informations (cf. section VII.2.2.6).

Le nombre de clics est lui aussi soumis à deux effets contradictoires : nos résultats montrent que son augmentation est corrélée aux réponses fausses (cf. section VII.2.2.1) mais elle semble aussi liée à la confiance inspirée par la carte (cf. section VII.2.2.6).

D’après une étude sur l’exploration des résultats de moteurs de recherche (Moffat et al., 2013), il semble que le comportement des participants durant des tâches de recherche d’informations dépende de la quantité d’informations pertinentes rencontrées au cours de leur recherche. En particulier, deux effets sont observés :

- plus les participants trouvent d’informations pertinentes, plus ils sont susceptibles d’arrêter leur recherche,
- plus les participants ont investi de ressources dans une recherche d’information, plus ils ont tendance à poursuivre leur recherche.

Certains participants se lassent plus vite, tandis que d’autres aiment explorer plus longtemps, ce qui influence aussi les résultats.

Ces différents paramètres peuvent expliquer les effets ambivalents observés sur la durée de recherche d’informations et le nombre de clics.

2. De nouvelles variables utiles pour analyser les stratégies d’usage

Au cours de ce protocole, nous avons testé trois nouvelles mesures susceptibles d’enrichir l’analyse des usages des applications de géovisualisation : l’enregistrement de la durée avant

le premier clic et du nombre de clics, qui permettent des analyses quantitatives, et des traces d'utilisation, à portée plus qualitative.

2.1. Apports de la durée avant le premier clic

Concernant la durée avant le premier clic, nous avons posé l'hypothèse (cf. section VII.1.2.3) que cette variable pouvait refléter une difficulté à comprendre la question ou une hésitation avant d'utiliser l'interface pour y répondre. La première hypothèse est réfutée puisque la durée avant le premier clic n'est pas corrélée à la complexité cognitive des questions (cf. section VII.2.2.4).

En revanche, il semble que la durée avant le premier clic mette en évidence une hésitation des utilisateurs, liée à des problèmes d'ergonomie dans la modalité de géovisualisation dynamique : un « golfe de l'exécution » (selon la formule de Norman (1991)), qui freine les utilisateurs dans la traduction de leur objectif en une requête utilisant les fonctionnalités de l'interface (section VII.2.2.4).

Dans cette expérimentation, la durée avant le premier clic met finalement en évidence que la modalité de carte interactive est plus simple à utiliser pour le public cible, car elle engendre un effet de fatigue moindre et diminue la durée « d'hésitation » des participants (cf. section VII.2.3.2).

Une durée avant le premier clic longue n'est cependant pas suffisante pour conclure à un effet d'hésitation des participants. Cette conclusion n'a pu être formulée qu'en la mettant en relation avec l'observation directe des participants durant la passation du test.

La durée avant le premier clic est par ailleurs susceptible de dénoter une période de recherche visuelle dans l'espace de la carte pour trouver une localisation d'intérêt, avant de cliquer (cf. section VII.2.2.3).

Cette variable est donc intéressante, mais pas auto-suffisante, pour révéler des effets d'hésitation ou des problèmes d'ergonomie.

2.2. Apports de l'écart au nombre de clics optimal

Nous n'avons pas analysé le nombre de clics lui-même, mais l'écart à un nombre de clics optimal, défini au préalable par l'expérimentateur. Cette transformation était censée gommer les effets de l'introduction des boutons de contrôle de l'animation, pour mieux considérer les clics dans le reste de l'interface (cf. section VII.1.2.3).

L'écart au nombre de clics optimal est corrélé positivement avec la durée de réponse et augmente lorsque la réponse est fautive (cf. section VII.2.2.1). Il semble donc traduire en partie l'efficacité de la visualisation.

Il s'est cependant révélé le plus intéressant pour analyser le comportement des utilisateurs dans l'interface : il est notamment le seul indicateur quantitatif qui révèle des différences dans l'appréhension des dimensions de l'information (temps, espace) en fonction de la modalité de carte utilisée (cf. section VII.2.2.3).

L'écart au nombre de clics optimal a ainsi permis de mettre en évidence que la carte dynamique facilite l'appréhension de la dimension temporelle de l'information (écart au nombre de clics optimal faible) mais complique la lecture de l'espace (écart élevé), par rapport à la modalité interactive. Il constitue donc un indicateur synthétique de la façon dont les utilisateurs recourent à l'interface au cours de la durée mise pour répondre.

2.3. Apport des traces d'utilisation

Le nombre de clics est également un indicateur intéressant lorsqu'il est associé aux traces d'utilisation. Pour rappel, les traces d'utilisation sont un enregistrement des zones de l'interface sur lesquelles l'utilisateur a cliqué, chaque interaction étant associée à un horaire. Elles permettent ainsi de reconstituer la séquence de clics dans l'interface d'un participant, qui peut être analysée visuellement sous la forme d'un actogramme (cf. Figure 4.27).

Les traces d'interaction ont apporté trois types d'éléments à l'analyse :

- Identifier les modules les plus utilisés dans l'interface, en relation avec les questions posées : par exemple, les utilisateurs de la modalité de carte interactive recourent d'avantage à la ligne de temps pour répondre aux questions portant sur le temps ou sur la combinaison temps et espace (cf. section VII.2.2.3),
- Identifier les changements de comportement d'utilisation, induits par certaines questions perturbatrices : par exemple, un nombre d'interaction plus élevé lors de la réponse à la question de complexité « analyse » (cf. section VII.2.2.4) ou bien la concentration sur une seule fonctionnalité aux dépens des autres lorsque la question est imprécise (cf. section VII.2.2.5).
- Identifier les stratégies d'usage de l'interface mises en œuvre, par exemple le fait qu'il existe trois stratégies d'usages combinant la ligne de temps et la carte, pour prendre connaissance du récit dans la tâche complexe (cf. section VII.2.5.2).

A ce titre, les traces d'utilisation permettent de tirer des conclusions comparables à d'autres techniques d'analyse qualitative, telle que l'oculométrie (ex: voir Fabrikant et al. (2008)). En revanche, il nous semble que leur analyse est plus aisée et moins chronophage que celle des données issues de l'oculométrie, en l'état actuel des technologies d'analyse disponibles. En particulier, les traces d'utilisation sont constituées d'une séquence enregistrée sur une dimension (le temps) alors que les données oculométriques doivent être décodées selon trois dimensions, dépendant à la fois de l'espace et du temps.

Ainsi la visualisation des traces d'utilisation sous la forme d'actogrammes fait efficacement

ressortir l'ordre des interactions, les actions les plus fréquentes et permet de comparer visuellement les comportements des utilisateurs en réordonnant les traces dans l'interface d'analyse. L'analyse de traces peut également être enrichie par des méthodes d'analyse quantitatives, telles que la recherche automatique de motif ou la détection des séquences d'interactions les plus fréquentes, que nous n'avons pas testées dans le cadre de ce travail mais qui existent dans les logiciels du marché⁵⁷.

Les traces d'utilisation semblent en revanche fournir moins d'informations en quantité que l'oculométrie. Si elles permettent de décrypter les stratégies d'actions des utilisateurs, elles ne mettent pas en exergue les processus cognitifs sous-tendant ces actions, comme peut le faire l'observation du regard. De plus, les actions qui ne nécessitent pas d'interaction (ex : lire la légende de la carte) ne sont pas enregistrées dans les traces et ne peuvent donc pas être analysées.

Les traces d'utilisation sont donc une alternative intéressante à la méthode de l'oculométrie.

L'analyse des traces d'utilisation semble être plus efficace, en termes de temps nécessaire à l'analyse, que le traitement des résultats issus de l'oculométrie, mais cette méthode fournit moins d'information sur les processus cognitifs des utilisateurs. Nous recommandons donc de l'utiliser dans les cas d'étude orientés vers l'analyse des comportements d'usage d'interfaces, dans lesquels la compréhension des processus cognitifs sous-tendant l'exploration est plutôt secondaire.

3. Proposition d'un protocole expérimental adapté à la géovisualisation

Dans la section VII.1.2.3, nous proposons un protocole expérimental en 4 phases :

- une phase introductive à l'application,
- deux phases de réalisation de tâches :
 - o la première consistant en la réalisation de tâches élémentaires, inspirée des protocoles en psychologie cognitive,
 - o la seconde sur la réalisation d'une tâche complexe, renseignant sur la navigation dans l'interface, dans un objectif conforme à un cas d'usage réel,
- une phase conclusive.

Les résultats expérimentaux obtenus et les limites identifiées suite à notre expérimentation nous conduisent à proposer un nouveau modèle de protocole expérimental, amélioré et

⁵⁷ Nous avons notamment utilisé le logiciel UT-Orange dans notre analyse, qui propose ce genre de fonctionnalités. Source : <https://undertracks.imag.fr/php/help/>, consulté le 19/01/2017.

susceptible d'être réutilisé dans d'autres tests à l'échelle des interfaces de géovisualisation. Ce modèle de protocole est présenté sur la Figure 4.51.

Nouveau plan de protocole expérimental standardisé

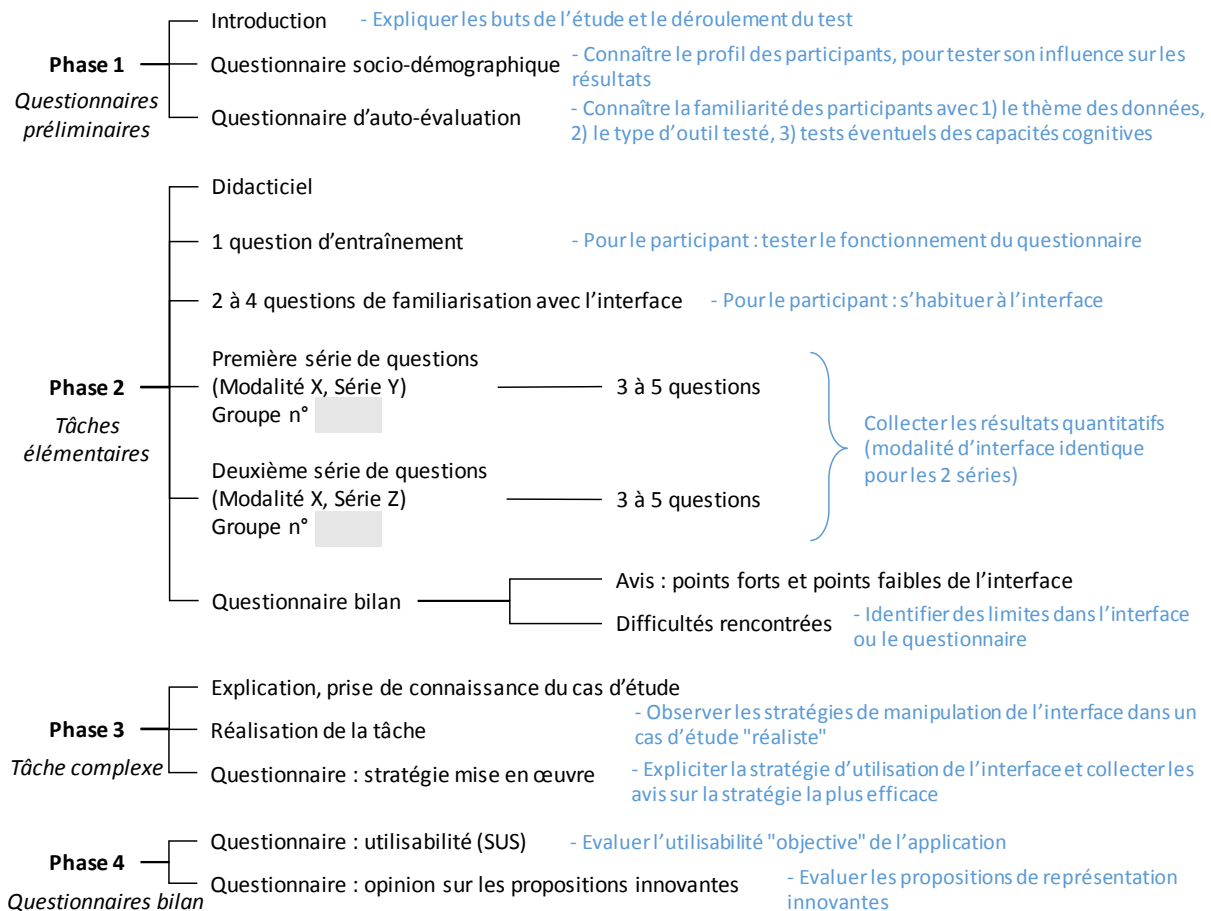


Figure 4.51. Modèle de protocole expérimental adapté au test d'une interface de géovisualisation (remplir les zones grises avec le numéro du groupe)

Ce protocole reprend les 4 phases préalablement définies, en modifiant par endroits leur contenu.

3.1. Phase 1 : questionnaires préliminaires

La première phase est semblable à celle mise en œuvre dans notre protocole. Elle commence par une introduction des objectifs de l'étude, puis propose deux questionnaires :

- un questionnaire démographique : bien que notre expérimentation n'ait pas permis d'identifier une influence des variables démographiques sur les résultats des participants, il nous semble utile de connaître le profil des participants, ce serait-ce que pour émettre un avis sur la généralisation des résultats en dehors de l'échantillon d'étude (ex : les résultats de notre expérimentation ne sont applicables qu'à un public d'experts du domaine),

- un questionnaire d'auto-évaluation : nos résultats ont notamment montré que la familiarité avec le thème des données et la familiarité d'usage de sources de données informatisées ont une influence sur les résultats au test (cf. section VII.2.2.6). Il pourrait également être intéressant ici d'évaluer certaines capacités cognitives pouvant influencer la variable indépendante testée ainsi que des paramètres contextuels sur l'état d'esprit des participants au moment du test (cf. section VIII.1.1), dans le but de les corrélés aux résultats.

3.2. Phase 2 : Tâches élémentaires

3.2.1. Plan d'expérimentation et participants

La seconde phase consiste à tester la variable indépendante à travers la réalisation de tâches élémentaires. Contrairement à ce qui a été mis en œuvre dans notre protocole initial, nous recommandons ici de suivre un plan expérimental *between-group* (cf. section VIII.1.2), chacun des groupes testant une seule modalité de la variable indépendante.

Lors du test d'une interface de géovisualisation, une problématique est d'identifier les influences relatives de la variable indépendante ou du design de l'interface en lui-même. A cet effet, nous recommandons de conserver deux séries de questions, visant à tester indépendamment ces deux paramètres :

- la première série contient des questions dont la réponse implique l'usage de l'interface globale,
- la deuxième série contient des questions interrogeant les caractéristiques de la variable indépendante uniquement.

Il est utile d'échanger l'ordre des deux séries pour la moitié des participants afin de pallier l'effet de fatigue (cf. section VIII.1.3). Pour ce faire, la présentation des questions peut suivre un plan carré latin, répartissant les participants en deux groupes par modalité de variable indépendante testée, comme illustré dans le Tableau 4.5.

Tableau 4.5. Ordre de passation des deux séries de tâches élémentaires (remplir les zones grises avec le nom des modalités)

	Variable indépendante			
	Modalité 1		Modalité 2	
	Intitulé : ██████████		Intitulé : ██████████	
Questions sur l'interface globale	Groupe 1 1 ^{ère} série	Groupe 2 2 ^{ème} série	Groupe 3 1 ^{ère} série	Groupe 4 2 ^{ème} série
Questions sur les différences liées à la variable indépendante	Groupe 1 2 ^{ème} série	Groupe 2 1 ^{ère} série	Groupe 3 2 ^{ème} série	Groupe 4 1 ^{ère} série

Pour pouvoir conduire des analyses statistiques quantitatives, chaque groupe doit contenir au minimum 5 participants, ce qui conduit à 20 participants ou plus dans le cas où 2 modalités de la variable indépendante sont testées, 30 ou plus dans le cas où 3 modalités

sont testées, etc.

3.2.2. Questions d'évaluation

Nous avons vu que le type de question a une influence directe sur les résultats des participants (cf. section VII.2.2.4). Les questions appartenant à chaque série doivent donc être élaborées en respectant certains paramètres.

Il est notamment nécessaire de contrôler la complexité cognitive des questions, selon la typologie d'Anderson et Krathwohl (2001). Cela peut se faire de deux façons :

- soit en maintenant le niveau de complexité constant pour toutes les questions (ex : uniquement des questions de complexité « compréhension »),
- soit en établissant un jeu de questions de différents niveaux de complexité connus. Il est préférable de compter au moins deux questions de chaque niveau de complexité, pour diminuer la variabilité éventuelle liée par exemple à la formulation de la question.

L'appartenance des questions à d'autres typologies peut également être contrôlée, dans le but d'améliorer la comparaison entre études scientifiques et/ou de tester leur effet sur les résultats. Parmi les typologies de questions d'évaluation préalablement utilisées en cartographie, nous pouvons notamment citer (Golebiowska et al., 2017) :

- la taxonomie de tâches de Wehrend et Lewis (1990) : localiser, distinguer, analyser la distribution, etc.,
- la taxonomie des opérations de bas niveau d'Amar et al. (2005) : trouver une valeur, filtrer, caractériser une distribution, corréler, trouver des anomalies, etc.,
- la taxonomie d'actions de Gotz et Zhou (2009) : actions d'exploration de données (ex : interroger, filtrer), actions d'exploration visuelle (ex : parcourir, zoomer, catégoriser), actions de déduction visuelle (ex : annoter, marquer) et actions de productions de connaissances (ex : créer, modifier, supprimer),
- la dimensionnalité de la tâche (Edsall, 2003; Tobón, 2005) : une ou plusieurs entités interrogées, croisé avec une ou plusieurs variables interrogées,
- les classes de questions d'analyses de Bertin (Bianchin, 2012) : élémentaire, intermédiaire, global,
- la dimension de l'information interrogée, utilisée dans notre expérimentation : attributaire uniquement, espace, temps ou temps et espace à la fois.

Vu le nombre élevé de ces typologies, il semble difficile de pouvoir se conformer à toutes, mais l'inspiration dans certaines d'entre elles est susceptibles d'enrichir les résultats.

3.2.3. *Déroulé de la phase 2*

Le fait qu'une seule modalité soit testée par participant a pour effet de raccourcir la durée de la phase 2 par rapport au protocole que nous avons mis en œuvre. Les étapes de didacticiel, pour apprendre à utiliser l'interface, les questions d'entraînement et les questions de familiarisation sont mutualisées pour les deux séries de questions. Ces étapes sont gardées inchangées par rapport à notre protocole, mais nous pensons que la réduction de leur nombre peut diminuer le risque qu'elles induisent un ressenti de complexité de l'interface auprès des participants (cf. section VIII.1.3).

De même, à la fin des deux séries de questions, l'avis sur l'interface et les points de difficultés rencontrés ne sont questionnés qu'une seule fois.

Pour maintenir une durée relativement faible de cette phase, nous recommandons de ne pas dépasser 12 questions au total (c'est-à-dire, par exemple, 2 questions de familiarisation, 5 questions dans la première série et 5 questions dans la deuxième).

3.2.4. *Mesures*

Pour mesurer l'efficacité relative des modalités de variable indépendante, le taux de bonnes réponses et la durée de réponse s'avèrent intéressants. L'écart au nombre de clics optimal est également un indicateur d'efficacité, qui est souvent redondant avec la durée de réponse mais peut parfois révéler des différences entre modalités (cf. section VIII.2.2). Nous jugeons sa prise en compte utile mais non nécessaire.

La durée avant le premier clic peut apporter des informations plus qualitatives sur le comportement des utilisateurs. Elle peut notamment dénoter une hésitation devant l'interface. Cependant, elle n'est utile que si elle est combinée avec l'observation directe des participants en cours de test car elle est peut également refléter d'autres comportements (cf. section VIII.2.1).

Les traces d'utilisation, tout comme l'oculométrie (Golebiowska et al., 2017), permettent d'analyser quels composants de l'interface sont mobilisés selon le type de question posé. Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes est un compromis entre la complétude des informations collectées, plus élevée avec l'oculométrie, et la rapidité d'analyse des résultats, plus élevée avec les traces d'utilisations.

Ces mesures qualitatives ont également un grand intérêt pour analyser les comportements complexes mis en œuvre dans la phase 3.

3.3. Phase 3 : Tâche complexe

La réponse à un cas d'étude complexe a montré son intérêt pour observer le comportement d'usage réellement mis en œuvre par les utilisateurs dans l'application de géovisualisation (cf. section VII.2.5). Elle permet notamment d'analyser les combinaisons entre l'usage des différents modules de l'interface et les stratégies de résolution de problèmes mises en

œuvre.

La phase 3 du modèle de protocole standardisé que nous proposons reprend les étapes mises en œuvre dans notre expérimentation : l'objectif de la tâche est expliqué, puis le cas d'étude est présenté, avant que les participants ne résolvent la tâche.

Dans notre test, la tâche complexe était une tâche du niveau de complexité cognitive le plus haut, « Création » : les participants devaient y collecter des éléments puis les réorganiser pour produire un résumé (cf. Tableau 4.2). Nous pensons que cette tâche pourrait également adopter un niveau de complexité « Analyse » ou « Evaluation », mais ne devrait pas se situer à un niveau de complexité cognitive trop faible, sous peine de perdre sa « complexité ».

L'identification des limites de nos analyses nous conduit à émettre deux recommandations pour adapter le design de cette tâche complexe (cf. section 2.5.4). Premièrement, les participants de notre expérimentation disposaient d'un temps limité pour réaliser la tâche complexe, ce qui a possiblement influencé les stratégies de réponse. Nous recommandons donc, dans la mesure du possible, de ne pas fixer de temps limité ou au moins une durée assez large dans laquelle il est envisageable de finir la tâche. Deuxièmement, ni la formulation de la question, ni les champs de réponses ne doivent influencer les réponses émises ou les modules utilisés pour répondre. La formulation de la question et le mécanisme de réponse doivent donc être soigneusement élaborés.

Suite à la réalisation de la tâche complexe, les participants émettent un retour d'expérience sur la stratégie mise en œuvre et donnent leur avis sur son efficacité. Cela permet d'une part d'explicitier les stratégies observées grâce aux mesures qualitatives (traces d'utilisation ou oculométrie) et d'autre part cela peut permettre d'identifier les stratégies d'usage jugées les plus efficaces.

Nous ne maintenons pas, en revanche, le questionnaire sur les modules de l'interface les plus utilisés (cf. section VII.1.2.3), qui fournit des résultats redondants avec les traces d'utilisation.

3.4. Phase 4 : Questionnaires bilan

Deux questionnaires bilans peuvent permettre d'évaluer la modalité testée par le participant. Le questionnaire d'évaluation de l'utilisabilité (SUS) fournit une note globale « objectivée », qui pourra être comparée entre les modalités testées. Quant au questionnaire final d'opinion, il permet d'évaluer auprès des utilisateurs les propositions de représentations ou de fonctionnalités innovantes intégrées dans l'interface.

Conclusion générale

Conclusion générale

Rappel des problématiques

Conduit dans le cadre d'un partenariat industriel avec la SNCF, l'objectif de ce travail de thèse était de concevoir une méthode de valorisation des informations historiques, sur les inondations et leurs impacts, pour alimenter l'analyse des experts du système ferroviaire.

La Partie 1 de ce mémoire nous a permis de montrer que la forme cartographique est adaptée à la valorisation des données sur les risques naturels, d'une part car elle permet de restituer la dimension spatiale des processus de risques et donc de les analyser dans leur contexte territorial, ce qui correspond aux besoins des experts du système ferroviaire (section I.3) et, d'autre part, car les cartes et les applications de géovisualisation ont démontré leur intérêt pour une diversité de publics et d'usage, pour visualiser, analyser les composantes du risques et prendre des décisions (section II.2).

Néanmoins la visualisation cartographique des données historiques sur les inondations soulevait un certain nombre de verrous méthodologiques.

- Premièrement, concernant la représentation des récits d'événements issus de risques. Les récits d'événements doivent être formalisés sous une forme qui permette, d'une part, leur retranscription automatisée sur une carte et d'autre part, qui corresponde à la représentation des événements par les experts. Ce modèle de récit doit également intégrer la description des effets dominos, qui constituent un enjeu majeur menaçant les installations ferroviaires.
- Deuxièmement, le récit d'événements ainsi formalisé pose question quant à sa visualisation cartographique. La représentation du temps et des dynamiques dans l'interface de géovisualisation, complexifié par la volonté de représenter les effets dominos, pose des problèmes méthodologiques et de lisibilité.
- En ce qui concerne l'adaptation de l'interface cartographique aux utilisateurs, face à une représentation des événements qui peut s'avérer visuellement complexe, l'enjeu est de garantir que cet outil reste utile et utilisable par ses lecteurs. La prise en compte des capacités cognitives de l'humain et des mécanismes mis en œuvre lors de la lecture de cartes peut amener à amender les règles de la cartographie et à faire des préconisations de visualisation, adaptées notamment à la visualisation de récits.

Ainsi notre recherche s'inscrit-elle dans une démarche orientée-utilisateurs, impliquant la connaissance de leurs besoins et de leur profil, de l'étape de formalisation des données d'entrée à l'usage de la visualisation cartographique.

Synthèse des contributions

L'état de l'art sur la visualisation cartographique des récits a révélé des manques dans les méthodes existantes (cf. conclusion de la Partie 3) :

- les applications de géovisualisation de récit donnent à voir des récits d'événements ponctuels ou de déplacements d'individus, mais peu ont étudié la visualisation de processus complexes tels que ceux intervenant dans une inondation,
- la majorité des méthodes de visualisation de récits cartographiques n'ont pas été testées auprès d'utilisateurs. Il n'est donc pas évident que ces propositions soient valides et adaptées pour notre public d'experts.

Pour pallier ces manques, nos contributions s'articulent selon quatre axes :

- une ontologie informatique, modélisant les récits d'événements survenus pendant une inondation et leurs impacts en chaîne sur le système ferroviaire,
- une proposition de représentation cartographique, pour restituer de façon lisible le récit des événements dans une carte animée,
- une proposition d'interface de géovisualisation, permettant de mettre en valeur les caractéristiques dynamiques et attributaires des événements de l'inondation,
- des propositions en termes d'évaluation expérimentale, concernant la mise en place d'un protocole adapté à l'évaluation d'une interface de géovisualisation dans son ensemble et des recommandations pour améliorer la reproductibilité des résultats expérimentaux.

Contribution 1 : l'ontologie IDISFER

Un récit peut être segmenté en une série d'événements, ou « faits historiques », liés entre eux par des relations de succession ou de causalités. Ce modèle de récit, issu de la littérature scientifique (section III.3.3), a été traduit dans une ontologie informatique dénommée IDISFER (Impacts des Inondations sur le Système FERroviaire), co-construite avec les experts du système ferroviaire grâce à des méthodes d'intelligence collective (section III.4).

Diffusée sous licence ouverte, elle décrit les phénomènes naturels susceptibles de survenir pendant une inondation, leurs impacts sur le système ferroviaire (infrastructure, circulation, maintenance et système humain) et les mesures de réaction mises en place pour restaurer le système dans un état stable.

Contribution 2 : représentations cartographiques de récits

Des règles automatisables ont été formulées pour associer les concepts des récits de risques, formalisés par l'ontologie IDISFER, à une représentation cartographique généralisable

(section VI.1). Ces règles se basent sur cinq cas d'études de crues historiques, possédant des régimes hydro-climatiques variés. Elles intègrent la connaissance des mécanismes cognitifs influençant la lecture de cartes (chapitre IV) et les méthodes de l'état de l'art sur la représentation cartographique des données spatio-temporelles (chapitre V).

Les principales propositions que nous émettons pour cartographier le récit d'une inondation sont (cf. section VI.1):

- l'association de la teinte et de la valeur de la couleur pour représenter la date des événements,
- la proposition d'une méthode intitulée la « pile chronologique » d'événements, pour éviter les superpositions visuelles entre symboles au cours du temps,
- la représentation des relations de causalité par des lignes reliant les événements, apparaissant sur demande ou au cours d'une animation de la carte.

Contribution 3 : propositions de géovisualisation

De manière à représenter les temporalités multiples associées aux événements, des vues graphiques parallèles ont été associées à la carte, au sein d'une interface de géovisualisation (section VI.2). Des fonctions interactives permettent d'interroger et d'explorer les données.

La contribution principale que nous proposons dans cette interface est la conception d'une « ligne de temps déployable », pouvant changer de forme sur demande de l'utilisateur. Elle existe sous trois formes :

- une ligne de temps à pas de temps régulier,
- une ligne de temps où l'espace graphique est étiré proportionnellement au nombre d'événements survenus chaque jour,
- une ligne de temps synthétique, donnant à voir un résumé sur l'ensemble de la période.

Ces différents modes d'affichages permettent de mettre en valeur des temporalités différentes des données.

Contribution 4 : propositions de méthode d'évaluation

Les propositions de représentations cartographiques des événements issus de risques ont été évaluées expérimentalement auprès d'utilisateurs experts du domaine ferroviaire (chapitre VII).

Le protocole proposé avait pour but de tester l'interface de géovisualisation dans sa globalité. A ce titre, il s'agit d'une proposition innovante par rapport aux expérimentations habituelles en cartographie, qui n'évaluent souvent qu'un composant ou qu'une

fonctionnalité spécifique de la carte. Cette approche globale nous a permis d'observer la manière dont des utilisateurs experts s'approprient une interface de géovisualisation, notamment leur usage des vues parallèles synchronisées que sont la carte, le graphique temporel et la vue attributaire.

En demandant aux experts de réaliser des tâches basées sur leur lecture de l'interface, cette évaluation a permis d'évaluer la lisibilité des propositions cartographiques et de géovisualisation. Les principaux résultats sont :

- La représentation des types d'événement par des symboles iconiques, familiers des utilisateurs, et la combinaison de la teinte et la valeur de la couleur pour représenter la date sont utilisables par les experts métier.
- La méthode de la pile chronologique d'événements est utilisable par ce public.
- La représentation des relations de causalité par des lignes reliant les événements n'est pas très lisible pour les experts et pourrait être améliorée. La lisibilité de ces relations est notamment meilleure lorsqu'elles peuvent être affichées sur demande interactive que lorsqu'elles apparaissent automatiquement au cours d'une animation.
- La méthode d'exploration du récit d'une inondation jugée la plus efficace par les participants consiste à s'appuyer sur la ligne de temps pour filtrer les événements par dates successives, en combinaison avec leur exploration via la carte pour analyser leurs caractéristiques et leur contexte spatial.

L'expérimentation a également permis de tester l'intérêt de trois variables innovantes pour suivre la performance des utilisateurs : la durée avant le premier clic, l'écart à un nombre de clics optimal, et les traces d'utilisation, qui se sont toutes avérées intéressantes pour faire ressortir différents aspects des comportements d'usage de l'interface.

Le retour d'expérience suite aux résultats expérimentaux nous a permis de proposer un modèle de protocole expérimental standardisé et réutilisable, adapté pour tester l'usage des interfaces de géovisualisation dans leur globalité.

Certaines limites ont été identifiées dans la représentation cartographique, telles que le manque de lisibilité des effets dominos, et dans la conception du protocole expérimental, notamment la non prise en compte de la complexité cognitive des questions lors de l'élaboration de l'expérimentation. Ces limites nous amène à formuler des pistes de recherches futures pour, d'une part, améliorer le design d'expérimentations et le caractère généralisable des résultats dans le domaine de la cartographie et, d'autre part, améliorer les représentations cartographiques de récits et d'effets dominos.

Pistes de recherches

Pistes sur l'évaluation expérimentale

Notre expérimentation montre que les résultats des participants ne dépendent pas uniquement des variables testées mais aussi de la nature des questions posées et de leur complexité cognitive. C'est le cas pour toutes les expérimentations, mais ce facteur est rarement pris en compte de manière formalisée.

Une solution pour rendre les résultats des expérimentations plus fiables et reproductibles pourrait être de partager les jeux de données et les jeux de tâches (ou questions) impliqués dans les expérimentations. Le test d'une nouvelle méthode cartographique ou d'une nouvelle fonctionnalité pourrait ainsi réutiliser le même jeu de données et les mêmes tâches, rendant les résultats plus comparables avec les expérimentations précédentes. Cependant, un frein à la réutilisation de protocoles expérimentaux passés est que les cartes et outils de géovisualisation sont souvent appliqués pour un domaine d'étude défini ; il est alors difficile de savoir à quel point les protocoles et résultats sont généralisables à d'autres domaines d'études (Kinkeldey et al., 2014, p. 375).

La volonté de produire des résultats indépendants d'un cas d'étude spécifique a conduit certaines études à simplifier les cartes à l'excès, parfois en s'affranchissant de tout domaine d'application, (Ahr et al., 2012; Griffin et al., 2006) ou à tester des symbologies en dehors de tout contexte cartographique (MacEachren et al., 2012). Ces méthodes ne nous semblent pas être une solution satisfaisante car il n'est pas évident que les résultats obtenus soient représentatifs du cas réel d'usage d'une carte géographique, dans laquelle de nombreux paramètres peuvent co-varier et s'influencer les uns les autres.

Nous proposons plutôt que les recherches futures s'attachent à développer des jeux de données standardisés, spécifiques à plusieurs domaines d'application courants (ex : démographie, risques naturels, mobilités), ainsi que des ensembles de tâches génériques, de complexités cognitives connues et maîtrisées et s'insérant dans les typologies de tâches expérimentales existantes (cf. section VIII.3.2.2). Cela permettrait d'améliorer la reproductibilité des recherches et la comparaison des propositions cartographiques.

Cette pratique est déjà appliquée dans le domaine scientifique de la recherche d'information (*information retrieval*), où ont été développés des jeux de données couvrant différents domaines thématiques (loisirs, santé, commerce...) et des ensembles de tâches afférents à tous les niveaux de complexité cognitive (Wu et al., 2012). Ces ensembles sont utilisés pour comparer l'efficacité des moteurs de recherche et le comportement des utilisateurs en conditions contrôlées (ex: Moffat et al., 2013).

Des recherches ultérieures pourront permettre de définir si ces pratiques peuvent être transposées dans le domaine de la cartographie et de quelle façon, ce qui pourra passer par

l'élaboration, puis le test de jeux de tâches standards adaptées à la cartographie.

Pistes en cartographie et géovisualisation de récit

Le format le plus fréquemment utilisé pour prendre connaissance de récits d'événements est le texte. Il est donc assez logique que les participants de notre expérimentation aient beaucoup eu recours à la description des événements sous forme textuelle, le texte apportant également plus d'informations que la carte et la ligne de temps seules. La plus grande habitude du format textuel et le niveau de détail plus grand apportés par le texte sont certainement les raisons pour lesquelles certains participants ont réclamé que les descriptions d'événements apparaissent au fur et à mesure de l'animation, dans l'emprise de la carte ou proche des événements auxquels elles se réfèrent.

Si le texte est le format préférentiel pour raconter et prendre connaissance d'histoires, pourrait-on rapprocher une carte narrative des méthodes du récit littéraire ?

Par analogie, on se rend tout d'abord compte qu'un certain nombre d'éléments du récit romanesque ne sont pas reportés dans notre carte ou bien différemment.

Tout d'abord, l'événement perturbateur, qui constitue l'essence même du récit (section V.4.1.1) est bien présent dans notre carte, il est même doté d'une couleur saillante, mais il ne provoque pas réellement de tension dramatique qui amène le lecteur à suivre le cours des événements suivants pour rechercher leur résolution. Les récits ne se contentent pas de recueillir les faits : « ils les agencent et les mettent sous tension entre un début et une fin, transformant ainsi la simple succession des événements en une totalité signifiante » (Kaempfer et Micheli, 2005). Notre récit cartographique devrait donc être d'avantage mis sous intrigue entre un début et une fin.

Par ailleurs, le récit simplifie et propose un itinéraire guidé dans les faits racontés, afin de « mettre en évidence la complexité de ce que notre expérience spontanée nous livre de façon floue » (Kaempfer et Micheli, 2005). En fait, Bal distingue trois niveaux d'informations dans le récit (Bal, 1997; Tuffield et al., 2006) :

- la *Fabula* représente les événements chronologiques, bruts, qui sont racontés,
- l'*Histoire* reprend un sous-ensemble de la fabula et le restructure selon une nouvelle séquence pour produire un effet particulier, tel que créer une attente ou informer le lecteur sur le contexte d'un sujet ; à partir d'une fabula, on peut donc dériver plusieurs histoires possibles,
- le *Récit* est l'histoire mise en forme en y ajoutant une sémantique propre à la forme choisie ; une histoire peut être utilisée pour produire des récits de plusieurs formes comme un monologue, un roman, un film ou une présentation multimédia.

Le récit de notre carte se limite en fait au niveau Fabula, en faisant l'impasse sur la mise en Histoire.

Pour mettre sous-intrigue le récit et passer du niveau fabula au niveau de l'histoire, la narratologie (science qui étudie les récits littéraires) rapporte que le récit peut jouer sur trois paramètres :

- l'ordre d'exposition des faits (anticipation, retour en arrière),
- la vitesse du récit (scène, pause, ellipse, sommaire),
- la fréquence des répétitions des événements de la fabula dans l'histoire (répétitif, singulatif, itératif).

En s'inspirant du modèle de récit de Syd Field (2005) utilisé pour réaliser les films hollywoodiens, Duarte (2010) dresse le portrait d'une présentation de faits scientifiques communicante :

- elle a un début (introduction, mise en contexte), un milieu (obstacles et actions) et une fin (résolution) clairement distinguables,
- elle a une structure interne identifiable,
- le point de transition entre la partie de début et de milieu est un incident qui vient capturer l'intérêt du public,
- la partie du milieu est beaucoup plus longue que le début et la fin.

Il nous semble que notre récit cartographique donnant à voir les inondations manque d'étapes de transition entre les parties du récit, qui permettraient d'identifier clairement sa structure interne. Ces points d'articulation devraient être mieux mis en valeur, ce qui pourrait être réalisé au moyen de scènes intercalaires, de changement de rythmes dans l'animation ou encore de changements du titre ou de textes accompagnant la carte.

Pour mieux mettre notre récit sous tension, une solution pourrait aussi être de modifier l'ordre dans lequel sont présentés les événements : raconter d'abord les incidents catastrophiques, avant les phénomènes naturels qui les ont causés, pourrait permettre de créer une attente, selon le schéma : « voici ce qui est arrivé, nous allons maintenant vous raconter comment la situation en est arrivée là, puis comment les agents s'en sont sortis ». Voire, pourquoi pas, permettre au lecteur de choisir le type d'événement qui l'intéresse le plus, pour ensuite agencer l'ordre du récit autour de celui-ci.

Ensuite, pour passer du niveau histoire au niveau récit, dans la typologie de Bal (1997), il semble qu'il manque parfois une mise en valeur de l'enchaînement entre les événements de la carte : une accumulation de localisations au cours du temps, bien qu'elle puisse décrire certains phénomènes homogènes (tels que l'expansion d'une pandémie), n'est pas suffisante

pour suivre le fil d'une intrigue plus complexe. Il manque peut-être à l'orthographe instauré par la sémiologie graphique, une grammaire qui permettrait de lier les événements en un tout intelligible, voire une conjugaison, qui permettrait de mieux appréhender les temporalités.

La langue française comporte plusieurs temps du passé, utilisés dans les récits (Kaempfer et Micheli, 2005) :

- l'imparfait décrit plutôt des éléments de contexte ou qui se produisent graduellement,
- le passé simple décrit des événements remarquables ou brusques,
- le présent peut aussi être employé pour plonger le lecteur au cœur des événements comme si l'action était contemporaine de la lecture,
- le passé composé, souvent caractérisé par son incapacité narrative, présente des événements achevés, qui se suffisent à eux-mêmes, sans liens avec ceux qui les entourent.

La conjugaison exprimée par la carte que nous avons produite est probablement semblable à un récit qui n'utiliserait que le passé composé. Le passé composé met l'accent sur l'état qui résulte de chaque événement décrit, pas sur la continuité, comme l'illustre l'exemple ci-dessous :

« J'ai pris l'autobus à deux heures. Il faisait très chaud. J'ai mangé au restaurant, chez Céleste, comme d'habitude. Ils avaient tous beaucoup de peine pour moi et Céleste m'a dit: « On n'a qu'une mère ». Quand je suis parti, ils m'ont accompagné à la porte. J'étais un peu étourdi parce qu'il a fallu que je monte chez Emmanuel pour lui emprunter une cravate noire et un brassard. Il a perdu son oncle, il y a quelques mois. J'ai couru pour ne pas manquer le départ. »⁵⁸

(Albert Camus, *L'Étranger*)

Dans notre carte, chaque événement ponctuel paraît ainsi auto-suffisant, achevé et difficilement en relation avec les autres, malgré l'ajout ultérieur des lignes de causalité.

Pour présenter efficacement un récit, la carte gagnerait donc à enrichir sa grammaire et sa conjugaison. A chaque temps verbal pourrait correspondre une variable visuelle, dynamique ou classique. Le choix du temps verbal dépendrait non seulement des caractéristiques des événements mais aussi de l'impression à communiquer au lecteur (temps du récit antérieur, contemporain ou postérieur au temps de la lecture). Les lignes de causalités que nous

⁵⁸ Source : <http://brunorigolt.blog.lemonde.fr/passages-de-letranger-de-camus-presentes-a-loral/>
Espace Pédagogique Contributif, consulté le 02/11/2016

proposons peuvent être une première piste pour mieux faire apparaître la continuité entre les événements du récit, mais pour cela l'apparence de ces lignes devrait être améliorée, comme en témoignent les retours des utilisateurs précédemment décrits.

Par ailleurs, pour que le récit soit compréhensible, la carte peut-elle réellement se passer du format textuel, décrivant les événements par écrit ? (ou à l'oral ?) Si l'on se reporte au principe de la vidéo, l'équivalent de notre carte animée pourrait être un film documentaire, sans bande son, dans lequel s'afficheraient successivement les photos du résultat des événements, dans l'ordre chronologique. Ce film serait probablement insuffisant pour comprendre les relations entre les événements et le récit dans son ensemble. Ajoutons à cela qu'en suivant la segmentation des scènes d'apparition des événements dans notre carte, il arriverait qu'une dizaine de photographies, se référant à des événements différents, s'affichent à l'écran simultanément.

C'est pourquoi accompagner la carte de sous-titres, comme dans l'application présentant le récit de l'ouragan Katrina (section V.4.4.2), permettrait d'explicitier les événements et leurs relations au fur et à mesure qu'ils apparaissent dans la carte. Dans un souci de détail, la conjugaison des sous-titres textuels à l'imparfait ou au passé simple permettrait de renforcer l'impression de continuité dans le récit.

Il existe donc des pistes pour améliorer la cartographie des récits d'inondations et, plus généralement, des processus complexes intervenant durant les risques. Une première problématique pour mettre en pratique ces pistes est d'identifier dans quelle mesure les méthodes issues de la narratologie peuvent enrichir la cartographie. Et comment les fonctions interactives permettant la sélection, l'interrogation ou l'exploration, et la combinaison d'autres vues graphiques au sein de l'interface de géovisualisation peuvent-elles améliorer la navigation et la conduite d'analyse sur les événements issus de risques ?

Par ailleurs, il n'est pas certain que les quelques pistes que nous citons ici soient adaptées pour tous les publics et toutes les tâches. Ces propositions nécessiteront donc d'être testées auprès d'utilisateur, afin d'identifier quels facteurs améliorent l'utilisabilité et l'efficacité des cartes de récit.



Annexes

Annexes

Table des annexes

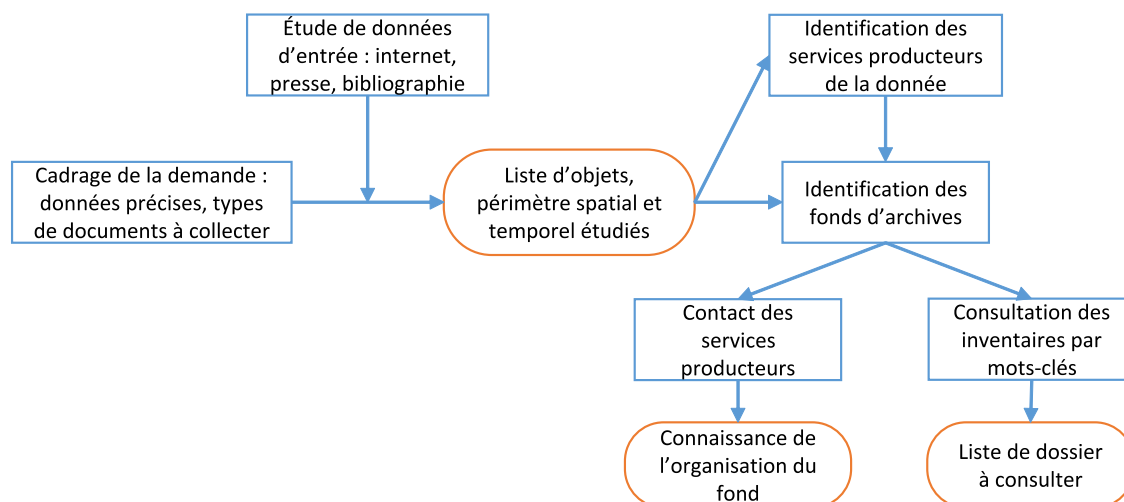
Annexe 1 : Méthode de collecte des documents d'archives	336
Annexe 2 : Description de l'ontologie relative au système ferroviaire.....	340
Annexe 3 : Elaboration d'une typologie des informations imparfaites.....	343
Annexe 4 : Script et questionnaire oral d'expérimentation	351

Annexe 1 : Méthode de collecte des documents d'archives

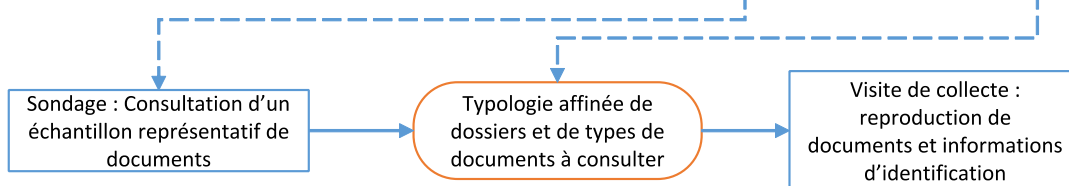
Curieusement, peu de méthodes de collecte et d'exploitation d'archives ont été publiées par les sciences historiques et chaque historien semble développer sa propre approche. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons été amenés à collecter un nombre important de documents pour retracer le récit d'inondations historiques.

Afin d'optimiser la recherche documentaire et la ré-exploitation des documents, nous avons formalisé une méthode de collecte et d'organisation des documents collectés en archives, avec l'aide d'un historien et d'une archiviste. Cette méthode est présentée sur la Figure A.1. Nous la détaillons ci-après.

1. PRÉPARER LA RECHERCHE



2. COLLECTER L'INFORMATION



3. ORGANISER L'INFORMATION

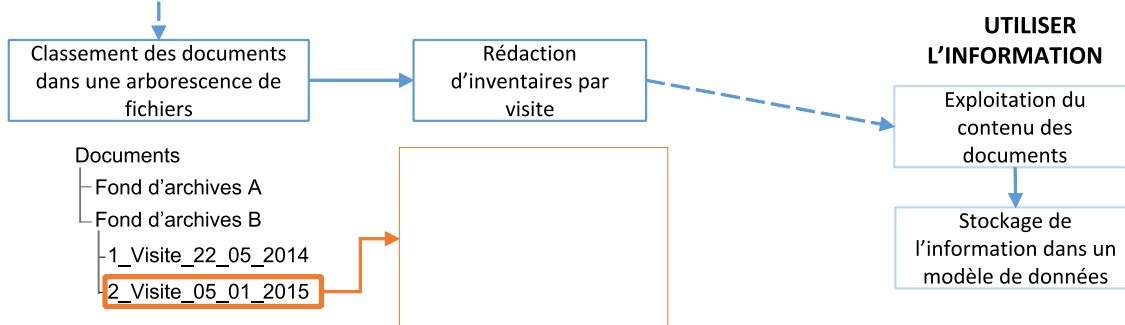


Figure A.1. Méthode de recherche et de capitalisation de documents d'archives

La première phase consiste à préparer soigneusement la recherche en archives, en amont même de la collecte. Cette phase préparatoire améliore la rapidité de la collecte dans ces salles sombres et poussiéreuses que sont parfois les locaux d'archives et augmente le nombre de résultats positifs. Cette phase préparatoire implique de :

- Cadrer précisément la recherche pour restreindre son périmètre et éviter d'obtenir une masse considérable de documents à traiter. Les sources documentaires externes, par exemple trouvées sur internet, peuvent être une aide, notamment pour limiter le périmètre géographique de recherche.
- Identifier les fonds d'archives (i.e. les lieux dans lesquels les archives sont stockées) susceptibles de contenir les ressources que l'on recherche. Ces fonds peuvent être chez l'organisme producteur de la donnée ou dans des centres d'archivages intermédiaires ou définitifs (cas des archives historiques). Contacter les gestionnaires de fonds permet de connaître le système de classement et d'accéder aux inventaires de documents éventuellement existants, ce qui accélère d'autant plus le ciblage de documents d'intérêt.

La seconde phase est la collecte d'archives *in-situ* :

- Dans le cas où aucun inventaire du fonds d'archive n'est disponible, il est stratégique de réaliser un « sondage » documentaire, afin d'optimiser la recherche. Il s'agit d'un inventaire rapide et ciblé de quelques dossiers jugés potentiellement pertinents : il consiste à survoler l'ensemble des documents contenus dans ces dossiers et, lorsqu'un document présente un intérêt thématique, à relever quelques informations d'identification succinctes (référence du dossier, thème, date et nature du document, description, photographie ou numérisation), avant de passer au document suivant. L'analyse du sondage permet :
 - o d'évaluer les chances de trouver des documents d'intérêt,
 - o de cibler précisément un nombre restreint de dossiers sur lesquels la consultation aura des chances d'être fructueuse ; ces dossiers seront parcourus plus exhaustivement,
 - o d'affiner la typologie des documents à rechercher (type, format, émetteur).

Ces informations permettent de passer à l'étape suivante.

- Si on dispose d'un inventaire, ou bien suite à un sondage, il est possible de parcourir directement les dossiers d'intérêt. Pour minimiser le temps passé dans les salles d'archives, la stratégie que nous avons élaborée consiste à lire succinctement les documents, à la recherche de mots-clés, et à numériser tous les documents d'intérêt sans s'appesantir sur leur contenu. La numérisation des documents (scan ou photographie) permet à la fois de passer du temps à traiter les documents dans un environnement plus agréable qu'un sous-sol et garantit la transmission et la réutilisation simple de cette information par des tiers. Il est nécessaire de relever les informations

d'identification du dossier au sein du fonds d'archives (rangée, travée, nom et côte du dossier) pour pouvoir retrouver l'original si nécessaire.

A l'issue de la phase de recherche, l'information collectée est constituée d'une liste des côtes de dossiers explorés dans le fonds et d'un ensemble de photographies. La troisième phase consiste à organiser ce matériel pour qu'il soit facile à exploiter et réutilisable dans d'autres contextes.

Nous avons adopté un classement en deux niveaux, proche du classement physique des archives :

- au premier niveau, les fichiers sont classés par fonds d'archive,
- au deuxième niveau, à l'intérieur du dossier informatique d'un fonds, ils sont classés par date de visite.

Chaque dossier de visite contient un inventaire, sous forme de tableur, des documents collectés pendant cette visite. Les tableaux relatifs à différentes dates d'exploration d'un même fonds sont susceptibles d'être regroupés dans un fichier unique à la racine du dossier grâce à une macro Excel.

Les champs décrits dans le fichier d'inventaire sont présentés dans le Tableau A.1. Le tableau contient des informations sur :

- l'identification du dossier d'archive,
- l'événement décrit par le document : sa localisation par ligne ferroviaire et point kilométrique (pk), sa date,
- la source documentaire elle-même : type de document, description de la pièce, date de production
- la description succincte du contenu du document et
- le numéro des photos ou scans du document collecté.

Pour exploiter informatiquement les documents, notamment rechercher des documents dans notre inventaire par nom, nous avons besoin d'avoir un identifiant unique pour chaque document. Les fonds d'archives proposent une côte documentaire unique associée à chaque boîte d'archive ou dossier, mais ce référencement n'était pas assez précis dans notre cas car un dossier peut contenir plusieurs documents très divers. Nous avons donc attribué un identifiant unique à chaque document, sur le modèle suivant :

- Deux à trois lettres référençant le fonds d'archive (ex : PM pour le PRI de Metz),
- La date de la visite de collecte, au format jjmmaaaa,
- Un numéro croissant à trois chiffres, unique pour chaque document (001, 002, etc.),
- ces trois parties sont séparées par un underscore (_).

Tableau A.1. Noms des colonnes dans la fiche d'inventaire des documents d'archives collectés

Nom de la colonne	Exemple
Localisation	Archives ouvrages d'art – grenier du PRI
Cote boîte / Nom du dossier	Pont sur la Lauch
Nom ligne	122 000
pK début	6,73
pK fin	6,75
Événement	Inondation décembre 1947-48
Typologie documentaire	Correspondance
Description du document	Conférence mixte ouverte sur le projet de reconstruction du pont de Gueviller sur la Lauch
Date de production	24/09/1948
Notes/Remarques	Ouvrage à voie unique de 10m20 d'ouverture droite, tablier métallique à poutres continues à âme pleine, de 21m de portée. L'ouvrage a donné passage, sans difficulté à toutes les crues connues, à l'exception des hautes eaux exceptionnelles de décembre 1947.
Numéros photos	2 à 4
Identifiant unique	PN_05012015_002

La méthode mise en place aboutit donc à un volume de documents restreint, directement pertinents. Les inventaires sous format tableur permettent ensuite de trier et filtrer les documents collectés selon l'inondation à laquelle ils se réfèrent, leur date de production ou la localisation qu'ils adressent, optimisant leur dépouillement et leur synthèse.

Annexe 2 : Description de l'ontologie relative au système ferroviaire

Dans le modèle IDISFER, l'ontologie décrivant le système ferroviaire est composée de quatre sous-ensembles : l'infrastructure de maintenance, l'exploitation ferroviaire (circulations de trains), l'infrastructure de la voie et le système humain.

La partie de l'ontologie relative à la maintenance contient d'une part les objets qui composent les ateliers de maintenance du matériel roulant (i.e. des trains) et d'autre part les EIV (Etablissement de maintenance des Voies) (Figure A.2).

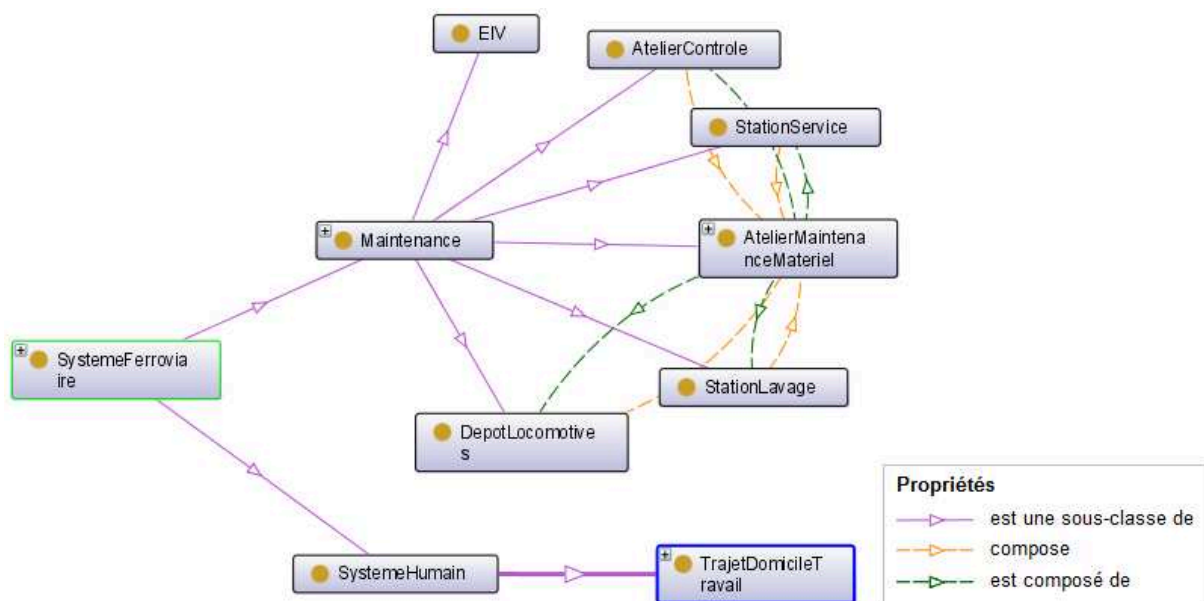


Figure A.2. Détail de la partie de l'ontologie du système ferroviaire, relative à la maintenance et au système humain

La partie relative à l'exploitation décrit les objets de la gare (bâtiment, lieux, alimentation électrique, mobilier, ERP et ouvrages de traversée des voies), le matériel roulant qui compose les trains, et les circulations ferroviaires (Figure A.3). Les circulations sont décrites à un niveau très macro dans cette première version de l'ontologie : un train et la ligne sur laquelle il circule composent une circulation. Les centres de commande du trafic interviennent pour la gestion de ces circulations. Les terminaux embranchés et relais de triage désignent les parties des lignes ferroviaires où les trains sont orientés.

La partie relative à l'infrastructure contient 7 sous-systèmes, qui correspondent au corps de métier de l'ingénierie : la signalisation, la télécommunication, les ouvrages d'art, les ouvrages hydrauliques, les ouvrages en terre, la voie et la traction électrique (Figure A.4). Ces sous-systèmes sont plutôt indépendants les uns des autres, mises à part quelques classes d'objet qui font le lien :

- les grands ouvrages hydrauliques sont considérés à la fois comme des ouvrages hydrauliques et des ouvrages d'art,

Annexe 3 : Elaboration d'une typologie des informations imparfaites

1. Définitions de l'imperfection

Les données historiques sur les risques naturels contiennent des imperfections : incertitudes, imprécisions, incomplétudes,... En effet, la reconstitution des événements historiques est le plus souvent réalisée à partir de traces anciennes sur le terrain et de témoignages provenant de sources multiples, qui ne révèlent qu'une partie du récit de l'époque et peuvent être sujets à la subjectivité, voire délivrer des informations contradictoires.

Le terme « imperfections », appliqué aux données informatiques, désigne des problèmes dans la qualité des données. Ce terme a été emprunté au domaine de l'intelligence artificielle, dans le cadre des théories de la logique floue (Bouchon-Meunier, 1995). Il est repris par plusieurs auteurs francophones en informatique et géomatique (Bard et al., 2003; De Runz, 2008; Smets, 1997; Snoussi et al., 2012). La littérature géomatique anglo-saxonne utilise plutôt le terme « incertitude » (*uncertainty*), qui s'impose comme un standard de fait notamment après la typologie de l'incertitude établie par Thomson et al. (2005) dans le domaine des renseignements. Dans la suite du texte, nous emploierons les deux termes selon ceux privilégiés par les auteurs cités.

Il existe plusieurs caractérisations de l'imperfection pouvant s'appliquer aux données spatio-temporelles mais aucune ne fait consensus. Les premières typologies fragmentent les types d'imperfection selon la provenance de ces imperfections :

- Flou contenu dans l'information, fiabilité des sources documentaires et généalogie de l'information (erreurs dans la chaîne de collecte et de traitements des données), selon Arnaud (2009, p. 199);
- Incertitude dans l'acquisition due aux méthodes de mesure, incertitude dérivée provenant des transformations de données et incertitude de visualisation introduite durant le processus de formatage des données pour les visualiser (Pang, 2008);
- Incertitude liée aux sources d'information, aux interpolations/extrapolations dans la cadre de modélisations (i.e. aux traitements de l'information) et à la mesure de l'incertitude parfois aléatoire (probabilité, pourcentage d'erreur, écart-type) selon Griethe et Schumann (2006).

D'autres typologies se basent d'avantage sur les problèmes de qualité relatifs à la nature de l'information géographique elle-même :

- La norme ISO 19157 (ISO/Technical Committee 211, 2013) distingue l'exhaustivité (ou complétude), la cohérence logique, la précision de position, la précision thématique, la qualité temporelle et l'utilisabilité (adéquation aux besoins). Son prédécesseur, la norme ISO 19113 intégrait également la généalogie.

- En utilisant aussi certains de ces critères, Pornon (1992) ajoutait l'état de mise à jour et l'homogénéité des informations.
- Dans la littérature anglo-saxonne, Thomson et al. (2005) listent 9 facteurs d'imperfections : l'erreur (différence entre observation et réalité), la précision (exactitude de la mesure), la complétude, la cohérence (entre composants de l'information), la généalogie, l'actualité (ou mise à jour), la crédibilité (ou fiabilité), la subjectivité et l'interrelation (indépendance des sources les unes des autres).

Il ne s'agit pas, ici, de citer toutes les études existantes mais d'en analyser quelques-unes qui proposent des points de vue différents sur l'imperfection. Parmi les travaux antérieurs, nous avons sélectionné trois classifications, qui se basent elles-mêmes sur des états de l'art (Arnaud, 2009; Skeels et al., 2008; Snoussi et al., 2012). La première est orientée vers la géomatique et les données géo-historiques, tout en intégrant des éléments issus des sciences sociales à travers la considération des facteurs humains lors du traitement des données et des facteurs liés aux sources de l'information, générateurs d'imperfections. La deuxième se focalise sur le cas d'usage des données spatiales et a été développée avec des experts du domaine. La troisième est une classification de haut-niveau développée dans le domaine de l'informatique et pas spécifiquement destinée aux données géographiques, mais qui utilise une terminologie plus exhaustive.

2. Etats de l'art des classifications de l'imperfection

La première typologie synthétisée à partir de la littérature a été proposée par Arnaud (2009). Elle est présentée dans le Tableau A.2. Elle résulte d'un état de l'art sur les typologies de l'imperfection dans les domaines de la géomatique et des sciences sociales. Principalement inspirée de la classification de Thomson et al. (2005), sa spécificité est que les 10 types d'incertitude listés sont explicitement classés par origine de l'imperfection : facteurs liés à l'information, facteurs humains, facteurs liés aux supports. Chacune de ces classes contient de 2 à 5 facteurs d'incertitude. Sept de ces facteurs sont ensuite classés parmi deux catégories :

- Les facteurs qui caractérisent l'information, d'une façon semblable à des métadonnées : l'incomplétude de l'information, la subjectivité des auteurs, la cohérence logique entre informations et l'objectivité (ou exactitude) de l'information ;
- Les critères de qualité relatifs à la donnée elle-même : l'imprécision de l'information, la fiabilité des sources et les erreurs de généalogie.

L'auteur souligne que ces facteurs sont liés et s'influencent les uns les autres (Figure A.5). Par exemple, la subjectivité des auteurs peut conduire à des problèmes de cohérence logique entre informations ou à des imprécisions de l'information. L'intérêt de cette classification est son inspiration dans les sciences sociales, qui enrichit la classification en tenant compte des sources de données et des facteurs humains d'imperfection.

Les limites de cette typologie tiennent d'une part au vocabulaire choisi. La majorité des termes sont traduits de l'anglais à partir de Thomson et al. (2005), exercice délicat s'il en est lorsqu'on essaie de distinguer « *accuracy* » et « *precision* » entre lesquels la nuance est très subtile même en anglais. Cependant, traduire « *accuracy* » par « objectivité » semble un peu éloigné de la définition qui en est donnée, à savoir « la marge d'erreur qui existe entre la réalité et l'observation (...) ou entre la réalité et le prédit » (Arnaud, 2009). Le fait que l'écart d'une mesure au réel, par exemple, soit une question d'objectivité ou de subjectivité de l'information est discutable. Dans ce cas, le terme « exactitude », proposé comme synonyme, ou bien le terme « erreur » associé par Thomson et al. (2005), paraissent plus parlant.

D'autre part, dans la répartition des imperfections en deux catégories principales, 3 facteurs ont disparus : l'exhaustivité (qui peut rejoindre la notion de complétude), la validité de l'information (état de mise à jour) et l'interrelation des sources d'information. Ces 3 facteurs sont considérés comme moins « caractéristiques de l'information dédiée aux événements issus de risques naturels ». Cette approche soulève cependant un vrai questionnement : est-il plus intéressant de se baser sur une classification complète, afin d'envisager tous les cas possibles dans notre étude, ou bien la sélection de quelques indicateurs les plus critiques serait-elle plus efficace pour exploiter les données ?

Tableau A.2. Les dix facteurs d'incertitude utilisés dans les sciences (Arnaud, 2009)

Facteurs d'incertitude		Disciplines scientifiques Articles		Sciences sociales		Géomatique		
		Roland- May (2000)	Lang et alii (2005)	Buttenfield (1994)	Thomson et alii (2005)	Skeels et alii (2007)	Griethe et alii (2006)	
Facteurs liés à l'information	Imprécision (dimension floue)							
	- sémantique	x						
	- spatiale	x	x	x	x	x		
	- attributaire (ex. 1 à 2m)			x				
	- granularité			x				
	Objectivité (exactitude)			x	x			
	Validité				x			
	Incomplétude				x			
	Exhaustivité			x		x		
Facteurs humains	Subjectivité des auteurs	x			x	x	x	
	Cohérence logique (accord/désaccord)			x	x	x		
F. liés aux supports	Erreurs techniques dans la lignée (généalogie, traçabilité)	x	x	x	x	x	x	
	Fiabilité/crédibilité des sources		x	x	x	x	x	
	Interrelation des sources				x			

© Aurélie ARNAUD, 2009

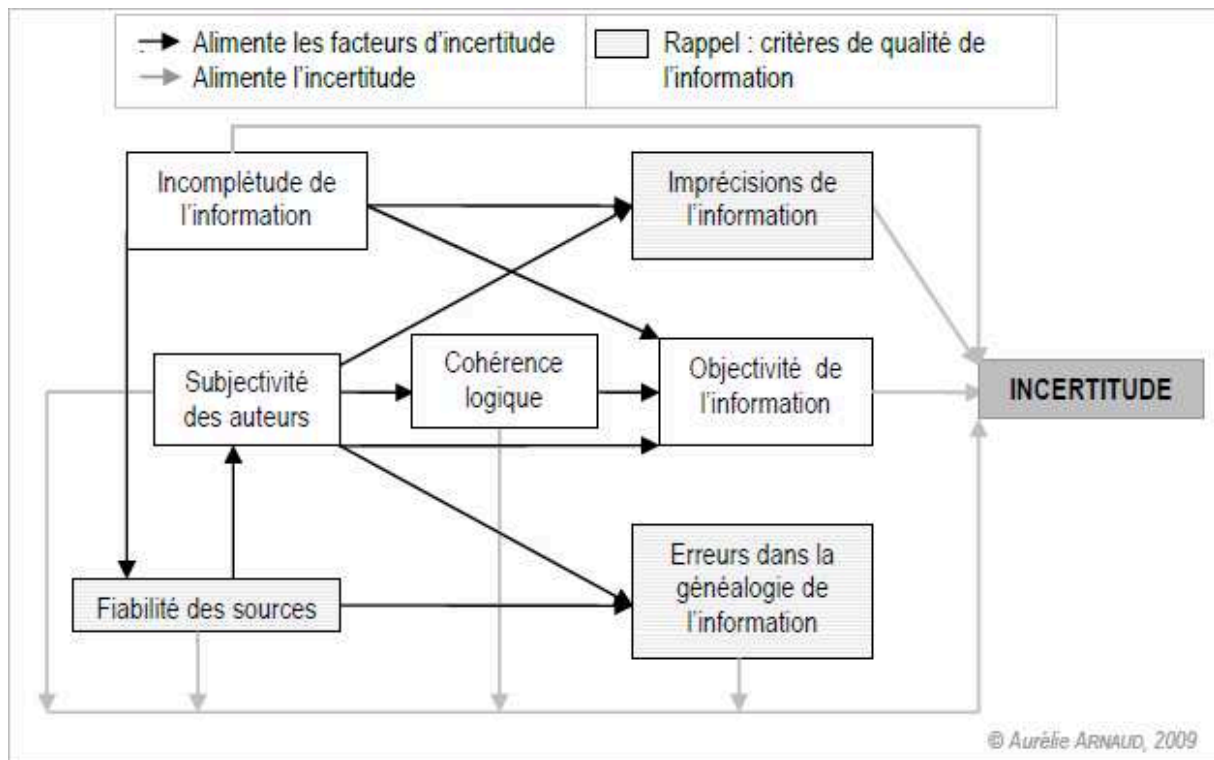


Figure A.5. Interrelations entre les facteurs d'incertitude de l'Information Dédiée aux Événements (Arnaud, 2009)

La seconde typologie étudiée a été proposée par Smets (1997) dans le champ de l'intelligence artificielle. Nous considérons ici une version de cette classification qui a été enrichie par Snoussi et al. (2012). Elle est présentée sur la Figure A.6. L'originalité de cette classification est qu'elle sépare tous les types d'imperfection recensés en trois grandes catégories : les imprécisions (les valeurs réelles sont situées dans un ensemble, fini ou infini – ex : « au nord de », « au XXe siècle »), les incohérences (contradiction entre informations) et les incertitudes (connaissance partielle ne permettant pas de conclure si la valeur est vraie ou fausse). De nombreux facteurs d'imperfection sont listés, ce qui constitue un thésaurus étoffé est assez exhaustif. Ces facteurs sont séparés en sous-branche : avec ou sans erreur, pour l'imprécision, objective ou subjective pour l'incertitude.

La classification est organisée sous la forme d'un arbre de décision, qui peut aider son utilisateur à choisir le terme approprié pour caractériser un type d'imperfection présent dans son jeu de données.

La limite principale de cette classification est qu'elle s'appuie seulement sur un nombre réduit de sources en informatique et intelligence artificielle et qu'elle ne se rattache pas aux travaux existants dans le domaine de la géomatique. Par conséquent, même si Snoussi et al. (2012) l'ont appliquée pour qualifier les phénomènes spatio-temporels dans le champ des risques naturels, elle n'a pas été alignée avec les travaux précédents en géomatique. Il n'est donc pas évident que les termes proposés soient bien choisis, en comparaison du vocabulaire usuellement employé pour les données spatio-temporelles. Il n'est pas non plus certain qu'elle soit adaptée aux utilisateurs manipulant ce type de données.

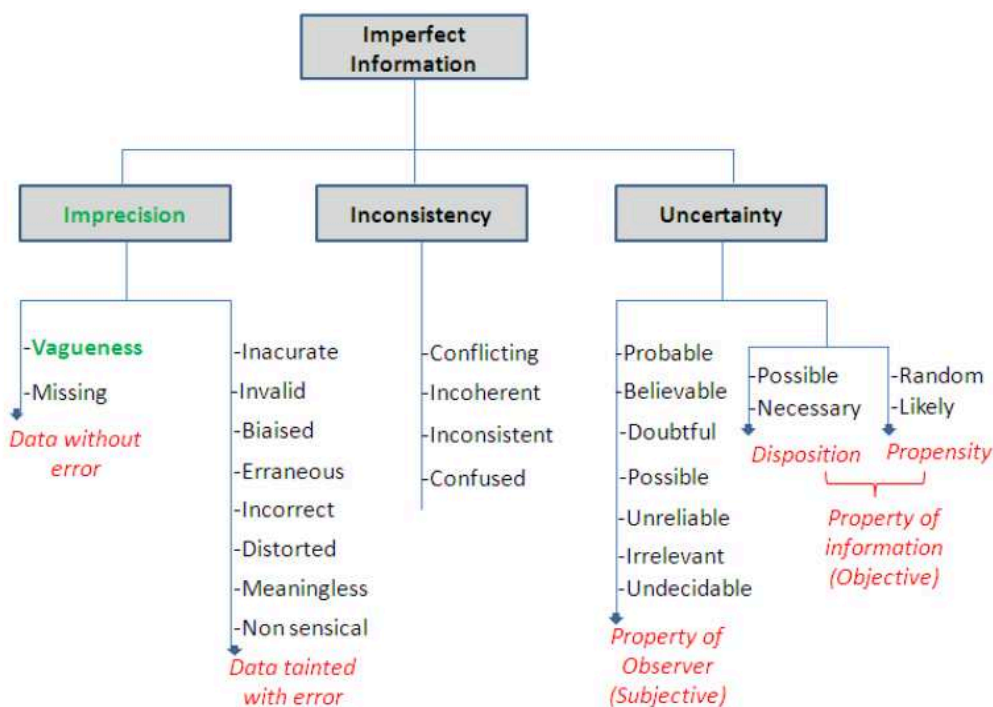


Figure A.6. Taxonomie de l'information imparfaite (Snoussi et al., 2012). Les termes écrits en vert sont ceux ajoutés par rapport à la classification de (Smets, 1997).

Enfin, la dernière typologie est celle de Skeels et al. (2008). Son principal intérêt est d'avoir placé l'utilisateur au centre de la réflexion sur les types d'incertitude, comme l'avait fait Gershon (1998). Les auteurs dressent une première typologie des types d'incertitude les plus répandus dans les domaines des sciences de l'information géographique et de la visualisation scientifique. Cinq facteurs d'imperfection, communs à ces disciplines, sont identifiés : l'approximation (mesure estimée d'un phénomène), la prédiction (pour un phénomène dont on n'est pas sûr qu'il fut ou qu'il va arriver), la contradiction (ou incohérence), l'incomplétude et la crédibilité (de la donnée ou de sa source). A travers des entretiens semi-directifs auprès de 18 participants de divers champs disciplinaires, qui sont confrontés à des incertitudes dans leur travail, les auteurs ont affiné la classification proposée.

Le résultat est que les multiples types d'incertitudes peuvent être classés en « niveaux » (ou « couches ») d'incertitude (Figure A.7).

- Le niveau le plus bas concerne les incertitudes dues à l'imprécision des mesures.
- Le niveau intermédiaire concerne les incomplétudes dans les données, qui peuvent être causés par un échantillonnage, par l'agrégation de données ou par des valeurs manquantes.
- Le niveau le plus haut est relatif aux incertitudes dans les inférences faites avec les données, c'est-à-dire à la façon dont on leur donne du sens et dont on les transforme en décision. Ce niveau inclue les processus de traitement de l'information (modélisation notamment), de prédiction ou d'inférence dans le passé.

Les deux facteurs restants, les contradictions et la crédibilité, peuvent concerner les trois niveaux : des mesures répétées et différentes, des jeux de données qui se recouvrent mais qui ne sont pas identiques, des inférences réalisées par deux modèles ou deux experts qui ne donnent pas les mêmes résultats. Aux trois niveaux, crédibilité et contradiction sont liées car, lorsqu'on observe une contradiction, on remet souvent la crédibilité des informations en cause.

Un projet ou jeu de données peut être concerné par un ou plusieurs de ces niveaux à la fois. Le découpage en niveaux permet de formaliser l'étape à laquelle une imperfection existe dans un jeu de données. Les utilisateurs interrogés par Skeels et al. (2008) considéraient le découpage en niveaux comme un point crucial et problématique à la fois. En effet, une incertitude relative à un niveau, même bien quantifiée, est difficile à répercuter lors du passage à un autre niveau, dans les cas où ce saut d'étape est requis par le processus de prise de décision.

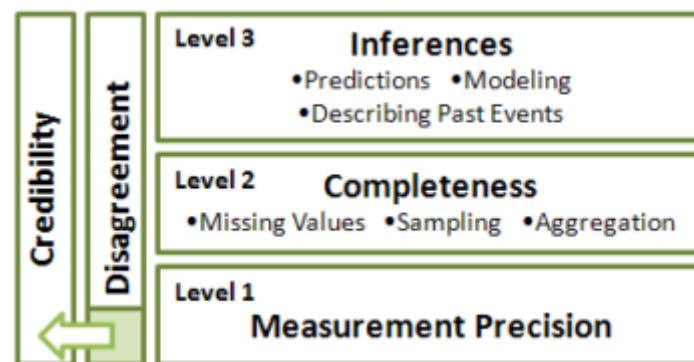


Figure A.7. Classification montrant les niveau (ou couches) d'incertitude (Skeels et al., 2008)

Le principal atout de cette étude est d'avoir impliqué les utilisateurs dans la construction de la classification. Cela conduit à une typologie fonctionnelle, correspondant aux différentes étapes de gestion d'un projet. Si l'on rapproche cette étude de la proposition d'Arnaud (2009), il est possible d'interpréter la segmentation de l'imperfection en niveaux comme un intérêt, de la part des utilisateurs, d'identifier la source des imperfections qui existent dans leurs données.

Les trois classifications explorées apportent des regards différents sur les types d'imperfection. Il s'agit maintenant de piocher dans les points forts de chaque typologie pour choisir la classification que nous allons adopter.

3. Définition fusionnée des imperfections

Dans notre contexte nous allons partir de la classification de Snoussi et al. (2012) qui présente l'avantage d'être relativement exhaustive et d'être structurée sous la forme d'un

arbre de décisions, qui peut aider dans le processus de qualification des imperfections. Certains types considérés en géomatique ont été ajoutés à cette base : la *validité* (ou *état de mise à jour*) et l'*interdépendance des sources* venant d'Arnaud (2009), et l'*agrégation* (ou information résumée) venant de Skeels et al. (2008).

Les typologies d'Arnaud (2009) et Skeels et al. (2008) dénotent que les utilisateurs se réfèrent au niveau ou à l'origine de l'incertitude : acquisition de mesures, stockage et traitement des données et utilisation humaine ou informatique pour Skeels et al. (2008), contenu de l'information, traitement humain et sources et supports de l'information pour Arnaud (2009). Nous allons conserver l'information sur ces niveaux d'origine de l'imperfection dans notre typologie, en synthétisant les deux propositions en 3 classes :

- Niveau 1 : Production des données. Cette étape génère des imprécisions (données vagues ou imprécisions avec erreurs), des incomplétudes, des données manquantes, des problèmes de dépendance des sources, d'incohérences et de fiabilité.
- Niveau 2 : Formatage et stockage de l'information. Cette étape peut conduire à des incomplétudes, des données manquantes, des imprécisions dues à l'agrégation, des ambiguïtés, des incohérences, des problèmes de subjectivité et de fiabilité.
- Niveau 3 : Traitement et utilisation de l'information. Cette étape peut générer des incomplétudes, des incertitudes objectives sur le résultat, des problèmes de jugement de la pertinence des résultats (pour les sorties de modèles de prédiction), des problèmes de mise à jour, des incohérences, des problèmes de subjectivité et de fiabilité.

La classification résultante est présentée sur la Figure A.8. Les niveaux d'imperfection sont indexés aux types. Lors de l'utilisation de cette classification, les niveaux d'imperfection peuvent permettre d'identifier et de catégoriser les types d'imperfections rencontrées dans les données considérées, lorsque leur niveau d'origine est connu ou, à l'inverse, peuvent permettre de cibler un ensemble de causes possibles de ces imperfections.

Etant donné les nuances extrêmement subtiles entre plusieurs types d'imperfections (par exemple *inaccurate* et *distorted*), il n'est peut-être pas nécessaire de toutes les distinguer lors de l'utilisation des données incertaines par un public d'experts. Par ailleurs, sans la compréhension par les utilisateurs de ce que sont les imperfections, une représentation de cette donnée serait *ad hoc* et inefficace (Thomson et al., 2005).

Nous avons donc évalué la typologie proposée auprès des experts du système ferroviaire et, sur cette base, avons proposé une méthode de visualisation cartographique de cette donnée. Les résultats ont été publiés et sont consultables dans les actes de la conférence Agile 2016 (Saint-Marc et al., 2016).

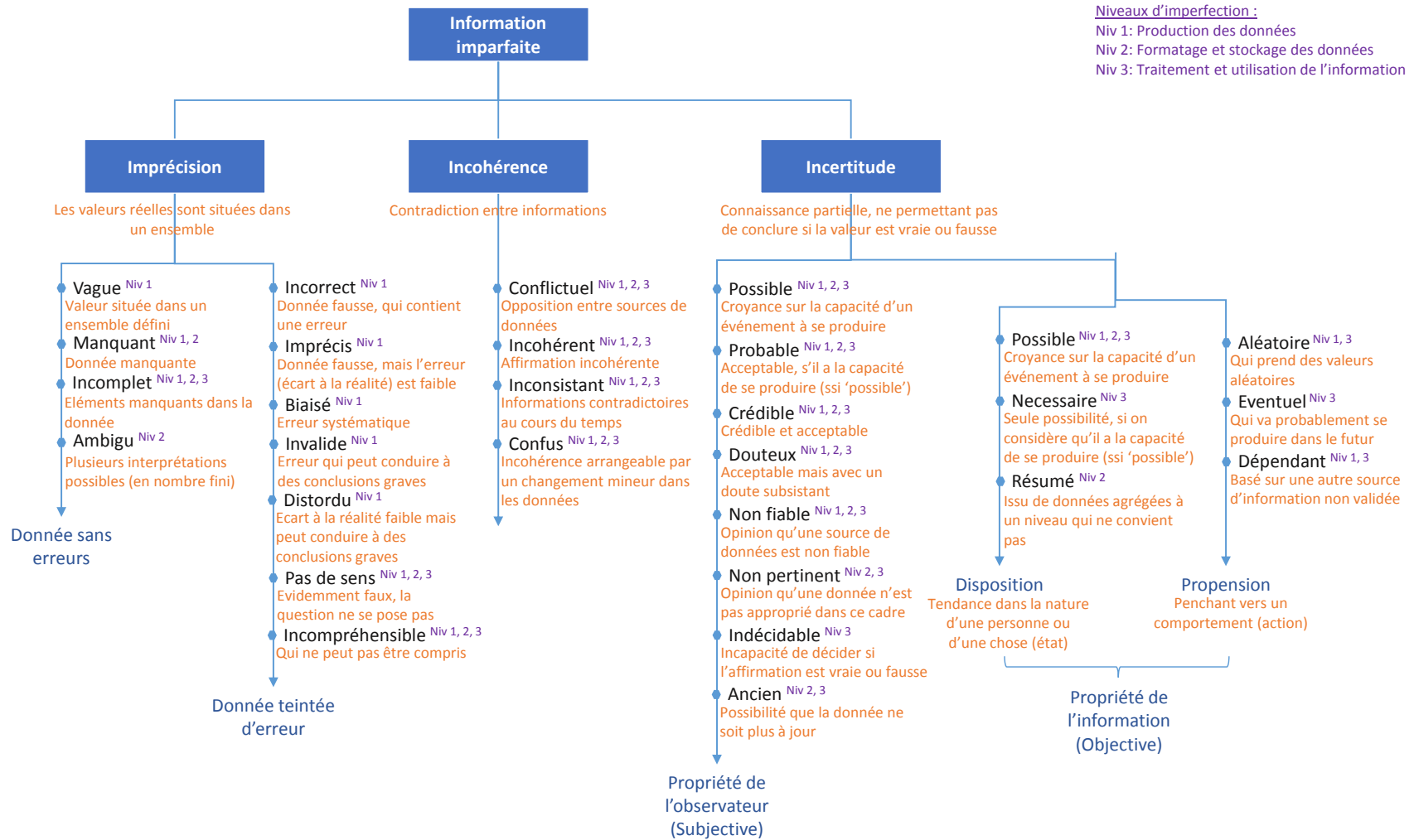


Figure A.8. Typologie de l'information imparfaite

Annexe 4 : Script et questionnaire oral d'expérimentation

1. Introduction

A/ Présentation du but de l'étude

« J'essaie d'évaluer l'efficacité de la carte des inondations historiques, développée dans le cadre de ma thèse, pour savoir si elle est lisible et utilisable.

Elle montre le récit d'une inondation historique et ses impacts sur le système ferroviaire. Le récit des inondations a été reconstitué à partir des archives de la SNCF.

Cette carte est intégrée à un logiciel. Aujourd'hui, il est encore au stade de prototype. Les propositions sont donc à valider et, à terme, d'autres fonctions pourront être développées. Je suis preneuse de toute remarque pour l'améliorer. »

B/ Présentation des tâches et du déroulement

« Le test alternera entre le test de la carte et la réponse à des questions.

Vous avez 2 écrans à votre disposition : sur celui de droite s'affichera une carte et sur celui de gauche s'afficheront des questions auxquelles vous devrez répondre à l'aide de la carte.

Phases :

- 1- Vous testerez 2 cartes et répondrez à des questions,
- 2- Je vous propose de réaliser une tâche un peu plus complexe, qui ressemble plus à un cas d'étude ferroviaire,
- 3- A la fin, une dernière série de questions permettra de collecter votre avis sur le logiciel.

Tout va bien jusqu'ici ? »

« Pour commencer, je vous propose un questionnaire pour mieux vous connaître. »

Votre âge	<input type="checkbox"/> De 20 à 29 ans	<input type="checkbox"/> De 30 à 39 ans	<input type="checkbox"/> De 40 à 49 ans	<input type="checkbox"/> De 50 à 59 ans
Votre genre	<input type="checkbox"/> F	<input type="checkbox"/> M		
Votre division dans l'entreprise SNCF	(texte libre)			
Ancienneté dans l'entreprise	<input type="checkbox"/> Moins de 2 ans	<input type="checkbox"/> De 2 à 5 ans	<input type="checkbox"/> Plus de 5 ans	
Votre domaine d'expertise	<input type="checkbox"/> Géologie/ Géotechnique	<input type="checkbox"/> Hydrologie/ Hydraulique	<input type="checkbox"/> Mécanique	
	<input type="checkbox"/> Génie civil	<input type="checkbox"/> Informatique	<input type="checkbox"/> Géomatique	
	<input type="checkbox"/> Autre			

Questions	Jamais	Occasionnellement	Régulièrement	Très souvent
A quelle fréquence travaillez-vous sur le thème des inondations ?				
A quelle fréquence manipulez-vous des logiciels informatiques métier ?				
A quelle fréquence utilisez-vous des cartes pour trouver des itinéraires ?				
A quelle fréquence utilisez-vous des cartes pour prendre des décisions ?				
A quelle fréquence utilisez-vous des informations sur des événements récents (postérieurs à 1990) dans votre travail ?				
A quelle fréquence utilisez-vous des informations sur des événements anciens (antérieurs à 1990) dans votre travail ?				
A quelle fréquence utilisez-vous des informations anciennes provenant d'archives papier ?				
A quelle fréquence utilisez-vous des informations anciennes provenant de sources de données informatisées ?				

2. Réalisation de tâches élémentaires

A/ Didacticiel

« Vous allez maintenant passer au test de la première carte. Ce sera une carte (statique / animée – selon le participant).

Tout d'abord, je vais vous expliquer comment cette carte fonctionne. »

B/ Tâches

« La Première carte concerne l'inondation de 1999 en Languedoc-Roussillon, sur la zone du viaduc de l'Orbieu. Vous y trouverez divers types d'informations sur l'inondation :

- pendant la période de crue (phénomènes, incidents)
- et la période de post-crue (circulations, réactions, travaux), jusque retour à la normale des circulations.

Je vous rappelle que la carte s'affichera sur le grand écran, à droite, et les questions sur le

petit écran, à gauche. »

1^{ère} carte : Consignes avant manipulation

« Pour voir à quoi ressemblent les questions, je vous propose de répondre à un premier exemple de question.

Quand vous serez prêts, cliquez sur le bouton « voir l'exemple ». »

(Suite à la première question d'exemple, affichage de la réponse correcte sur l'écran. Si la réponse est incorrecte, explication de pourquoi elle est incorrecte et comment le participant aurait pu accéder à la bonne réponse).

A la fin du test de la 1^{ère} carte

Questions	Tout à fait	Plutôt	Plutôt pas	Pas du tout
Diriez-vous que la carte que vous venez de manipuler est facile à comprendre ?				
Après explication de son fonctionnement, diriez-vous que la carte que vous venez de manipuler est facile à utiliser ?				
Dans l'ensemble, pensez-vous que les réponses que vous avez données aux questions sont correctes ?				
Pensez-vous que vous avez mis plus de temps à répondre pour les questions les plus difficiles ?				

« Je vais vous poser deux questions complémentaires : »

(3B1Q4) Citez trois choses que vous aimez bien dans cette carte.

-

(3B1Q5) Citez trois choses que vous n'aimez pas ou qu'il faudrait améliorer dans cette carte.

-

2^{ème} carte : Consignes avant manipulation

Même inondation, même zone – Premier exemple de question – Même procédure que pour la 1^{ère} carte.

Fin test 2^{ème} carte

Même questions qu'à la fin du test de la 1^{ère} carte.

C/ Questionnaire bilan de la Phase 2

(3CQ1) Quelle est votre modalité de carte préférée ?

-

(3CQ2) Pourquoi est-ce votre carte préférée ?

-

(3CQ3) Qu'est-ce qui vous a paru difficile durant ce test ?

-

3. Tâche complexe

Consigne

« Dans cette phase, vous allez avoir affaire à une nouvelle carte : celle de l'inondation de 1947 dans la ville de Metz.

Vous disposerez d'un temps limité pour répondre, de 15 minutes.

Je vous informe au préalable que cette durée ne sera pas suffisante pour répondre à l'ensemble des informations qui sont demandées. Ce n'est pas grave. L'objectif est de voir comment vous utilisez l'interface pour trouver les réponses.

La consigne va d'abord s'afficher, pour que vous puissiez en prendre connaissance avant le début du chronomètre, puis, quand vous serez prêt, vous pourrez cliquer sur le bouton « accéder à la carte ». »

Questions à la fin de la tâche complexe

(4BQ1) Comment avez-vous procédé pour retrouver les informations qui vous étaient demandées ? Quelle a été votre stratégie ?

-

(4BQ3) Ok, vous avez adopté cette stratégie. Si vous aviez à refaire l'exercice, utiliseriez-vous la même ?

-

(5Q9) Avez-vous eu l'impression d'apprendre quelque chose sur les inondations présentées pendant le test ?

→ Si Oui : **(5Q10)** Pouvez-vous donner un exemple d'information que vous avez apprise ?

-

(5Q11) Cet outil pourrait-il vous être utile dans votre métier ?

→ Si Oui : **(5Q12)** Pouvez-vous donner un exemple de situation dans laquelle il serait utile d'avoir recours à cet outil ?

-

4. Questionnaire final

Questionnaire SUS (System Usability Scale)

Traduit de l'anglais d'après Brooke (1986)

Questions	Pas du tout d'accord	2	3	4	Tout à fait d'accord
Je pense que je souhaiterais utiliser ce système fréquemment					
J'ai trouvé ce système inutilement complexe					
J'ai trouvé que le système était facile à utiliser					
Je pense que j'aurais besoin de l'aide d'un technicien pour être capable d'utiliser ce système					
J'ai trouvé que les différentes fonctions de ce système étaient bien intégrées					
J'ai trouvé qu'il y avait trop d'incohérences dans ce système					
J'imagine que la plupart des gens peuvent apprendre à utiliser ce système très rapidement					
J'ai trouvé le système très lourd à utiliser					
Je me sentais très confiant en utilisant le système					
J'ai eu besoin d'apprendre beaucoup de choses avant de pouvoir démarrer avec ce système					

Donnez votre avis sur les affirmations suivantes

« Voici la dernière série de question. Si vous avez un commentaire relatif à votre réponse, n'hésitez pas à m'en faire part. »

Questions	Pas du tout d'accord	Plutôt pas d'accord	Plutôt d'accord	Tout à fait d'accord	Ne se prononce pas
L'affichage des symboles de façon empilée, pour montrer leur ordre, est compréhensible					
Le cas où des événements survenus au même pk sont rangés dans plusieurs rectangles est compréhensible					
Il est utile d'afficher une photo aérienne de la zone en fond de carte					
Le fond de carte simplifié (gris) est utile					
Il est intéressant de montrer la date des événements grâce à des couleurs différentes					
Les lignes de causes et conséquences entre événements sont faciles à lire					
Il est parfois difficile d'identifier la date d'un événement					
Dans la légende, avoir des dégradés de couleurs différents selon la période (crue, décrue, ...) est intéressant					
Les symboles représentant les objets ferroviaires impactés sont compréhensibles sans avoir recours à la légende					
Dans la légende, pouvoir plier et déplier les dates (et les couleurs associées) est utile					
Les cases à cocher/décocher dans la légende, pour afficher/masquer des symboles, sont utiles					
Avoir à disposition deux lignes de temps détaillées (régulière et proportionnelle aux événements) est utile					
La ligne de temps synthétique est une entrée adaptée pour accéder au résumé des événements par jour					
Etes-vous satisfaits de la fonction « Conserver l'historique » ?					

Bibliographie

Bibliographie

- Abbott, M. (2013). Visualising a Temporal Cartography of Travel. In A. Moore et I. Drecki (Eds.), *Geospatial Visualisation*, p. 3-17. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- AFT. (2000). *Lexique topographique 1991/2000*. Paris (France): Association Française de Topographie.
- Agence Européenne de l'Environnement, E. (2013). Flood risk in Europe: the long-term outlook. Consulté 9 août 2016, à l'adresse <http://www.eea.europa.eu/highlights/flood-risk-in-europe-2013>
- Ahr, E., C. Guillemin, N. Mandran, C. Cuntz, É. Chesneau, P.-A. Davoine, et al. (2012). Pertinence cognitive des représentations dans les cartes animées: Elaboration d'un protocole expérimental. In *Sageo 2012*. Liège (Belgique).
- Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM* 26, 823-832.
- Amar, R., J. Eagan, et J. Stasko. (2005). Low-level components of analytic activity in information visualization. In *IEEE Symposium on Information Visualization 2005*, p. 111-117. Minneapolis (CA, USA): IEEE.
- Anderson, L. W. et D. A. Krathwohl. (2001). *A taxonomy for learning, teaching and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. New York (USA): Longman.
- Andrienko, G., N. Andrienko, P. Bak, D. Keim, et S. Wrobel. (2013). *Visual Analytics of Movement*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Andrienko, G., N. Andrienko, U. Demsar, D. Dransch, J. Dykes, S. I. Fabrikant, et al. (2010). Space, time and visual analytics. *International Journal of Geographical Information Science* 24, 1577-1600.
- Andrienko, G., N. Andrienko, J. Dykes, S. I. Fabrikant, et M. Wachowicz. (2008). Geovisualization of dynamics, movement and change: key issues and developing approaches in visualization research. *Information Visualization* 7, 173-180.
- Andrienko, G. et M. Chen. (2015). VAST Papers. *IEEE Vis 2015*. Consulté 22 avril 2015, à l'adresse <http://ieevis.org/year/2015/info/call-participation/vast-papers>
- Andrienko, N., G. Andrienko, et P. Gatalsky. (2003). Visual data exploration using space-time cube. In *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)*. Durban (South Africa).
- Anscombe, F. J. (1973). Graphs in Statistical Analysis. *The American Statistician* 27, 17-21.
- Arborio, A.-M. et P. Fournier. (1999). *L'Enquête et ses méthodes: l'observation directe*. Paris (France): Nathan Université.
- Archambault, D., H. Purchase, et B. Pinaud. (2010). Animation, Small Multiples, and the Effect of Mental Map Preservation in Dynamic Graphs. *IEEE transactions on visualization*

- and computer graphics 17*, 539-552.
- Arnaud, A. (2009). *Valorisation de l'information dédiée aux événements de territoires à risque. Une application cartographique et géovisualisation de la couronne grenobloise*. Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Arnaud, A. et P.-A. Davoine. (2011). Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude : Application à l'information dédiée aux risques naturels. *Revue Internationale de Géomatique 21*, 205-224.
- Atkinson, R. et R. Shiffrin. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. In K. W. Spence et J. T. Spence (Eds.), *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*, Vol. 2, p. 89-195. New York (USA): Academic Press.
- Auer, T., C. McCabe, S. Pezanowski, et A. M. MacEachren. (2010). HerbariaViz: A web-based interface for mapping California flora data. Consulté 1 février 2014, à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=ok3Ha2j_Pmk
- Babitski, G., F. Probst, J. Hoffmann, et D. Oberle. (2009). Ontology Design for Information Integration in Disaster Management. *Informatik 2009* 3120-3134.
- Baddeley, A. D. et G. Hitch. (1974). Working memory. *Psychology of learning and motivation 8*, 47-89.
- Bahoken, F., C. Lagesse, et C. Ducruet. (2016). L'approche cartographique de la représentation du mouvement spatial : L'exemple des flux commerciaux maritimes euroméditerranéens. In *Sageo 2016*. Nice (France).
- Bal, M. (1997). *Introduction to the theory of Narrative*, 2^e éd. Toronto (Canada): University of Toronto Press.
- Banos, A. et J. Lacasa. (2007). Spatio-temporal exploration of SARS epidemic. *Cybergeog : European Journal of Geography*.
- Bard, S., B. Bouchon-Meunier, A. Ruas, et M. Detyniecki. (2003). Gestion des connaissances imprécises pour évaluer la généralisation cartographique. In *Conférence Logique Floue et Applications (LFA'03)*, p. 8. Tours (France).
- Barsalou, L. W. et D. R. Sewell. (1985). Contrasting the representation of scripts and categories. *Journal of Memory and Language 24*, 646-665.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: An experimental and social study*. Cambridge (UK).
- Beck, E., C. Weber, et M. Granet. (2006). Etude multirisques en milieu urbain et SIG : le cas de l'agglomération de Mulhouse. *Revue Internationale de Géomatique, Numéro spécial : information géographique et gestion des risques 16*, 395-414.
- Bell, K. (2010). Visualizing Crime - A « Data Rose » Blooms. Consulté 5 août 2015, à l'adresse <http://www.directionsmag.com/entry/visualizingcrime-a-data-rose-blooms/204984>
- Bénaben, F., C. Hanachi, M. Lauras, P. Couget, et V. Chapurlat. (2008). A metamodel and its ontology to guide crisis characterization and its collaborative management. In F. Fiedrich

- et B. Van de Walle (Eds.), *Proceedings of the 5th International ISCRAM Conference*, p. 189-196. Washington DC (USA).
- Bernier, J., J. Miquel, A. Lebossé, et A. Griffet. (1986). Use of additional historical information for estimation and goodness of fit of flood frequency models. In *International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis*, p. 153-164. Baton Rouge (Louisiana, USA).
- Bertin, J. (1967). *Sémiologie graphique: Les diagrammes-Les réseaux-Les cartes*. Paris (France): EHESS.
- Bertin, J. (1981). Graphics and Graphic Information Processing. In *Graphics and Graphic Information Processing*, p. 24-31. Berlin (Germany): De Gruyter.
- Bertin, J. (1983). *Semiology of Graphics*. Madison (USA): University of Wisconsin Press.
- Bessadok, F., C. Dominguez, et A. Ruas. (2011). Automatic Evaluation and Improvement of Map Readability. In *25th International Cartographic Conference (ICC2011)*, p. 6. Paris (France).
- Bianchin, A. (2012). Actualité de l'approche de Jacques Bertin dans l'enseignement de la cartographie. *CFC 212*.
- Black, J. B. et H. Bern. (1981). Causal coherence and memory for events in narratives. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 20, 267-275.
- Blaise, J. et I. Dudek. (2013). Comment raisonner sur le paramètre temps ? Réflexions et retours d'expériences. In E. Lorans et X. Rodier (Eds.), *Archéologie de l'espace urbain*, p. 309-324. Presses Universitaires François Rabelais / CTHS.
- Blanchet, A., H. Bézille, M.-F. Florand, A. Giami, F. Ginst-Desprairies, A. Gotman, et al. (1985). *L'Entretien dans les Sciences Sociales*. Paris (France): Dunod.
- Bodemer, D., R. Ploetzner, I. Feuerlein, et H. Spada. (2004). The active integration of information during learning with dynamic and interactive visualisations. *Learning and Instruction* 14, 325-341.
- Bonin, O., F. Bahoken, et S. Mermet. (2013). CARTOD/MAPOD : Visualiser la demande locale de transport. *Mappemonde* 112.
- Bonnet, C. (1989). La perception visuelle des formes. In *Traité de psychologie cognitive*, Vol. 1, p. 2-82.
- Bouchon-Meunier, B. (1995). *La logique floue et ses applications*. Paris (France): Addison-Wesley.
- Boudou, M. (2015). *Approche multidisciplinaire pour la caractérisation d'inondations remarquables : enseignements tirés de neuf évènements en France (1910-2010)*. Université Paul Valéry – Montpellier III.
- Bouhineau, D., V. Luengo, N. Mandran, M. Ortega, et C. Wajeman. (2013). Conception et mise en place d'un entrepôt de traces et processus de traitement EIAH : UnderTracks. In *6e Conférence sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH*

- 2013), p. 41-42. Toulouse (France): IRIT Press.
- Boyandin, I., E. Bertini, et D. Lalanne. (2012). A Qualitative Study on the Exploration of Temporal Changes in Flow Maps with Animation and Small-Multiples. *Eurographics Conference on Visualization (EuroVis) 2012* 31, 1005-1014.
- Bretagnolle, A., T. Giraud, et H. Mathian. (2008). La mesure de l'urbanisation des Etats-Unis, des premiers comptoirs coloniaux aux Metropolitan Statistical Areas (1790-2000). *Cybergeo : European Journal of Geography*.
- Brites. (2009). *La cartographie dynamique appliquée à la représentation de phénomènes historiques : Potentiels et efficacité d'un nouveau mode de représentation*. Université Paris 1.
- Brooke, J. (1986). SUS - A quick and dirty usability scale.
- Bruner, J. S. (1991). The Narrative Construction of Reality. *Critical Inquiry* 18, 1-21.
- Buard, E. (2012). Localisation des troupeaux d'herbivores au Zimbabwe : composer avec l'imprécision. *M@ppemonde* 107, 1-13.
- Buffon, G.-L. L. (1743). *Dissertation sur les Couleurs Accidentelles*. Registres de l'Académie Royale des Sciences.
- Caquard, S. (1998). La visualisation cartographique sur Internet. *Netcom* 12, 349-357.
- Caquard, S. (2003). Internet Maps and Public Participation: Contemporary Limits and Possibilities. In M. P. Peterson (Ed.), *Maps and the Internet*, p. 345-357. Elsevier Science.
- Caquard, S. (2011). Mapping Narratives: a Cybercartographic Application. In *25th International Cartographic Conference (ICC2011)*. Paris (France).
- Caquard, S. et W. Cartwright. (2014). Narrative Cartography: From Mapping Stories to the Narrative of Maps and Mapping. *The Cartographic Journal* 51, 101-106.
- Caquard, S. et T. Joliveau. (2016). Penser et activer les relations entre cartes et récits. *Mappemonde* 118.
- Caquard, S., D. Naud, et R. Gonzalès. (2012). Esquisses géographiques des récits cinématographiques Canadiens contemporains. *The Canadian Geographer* 56, 508-530.
- Card, S. K., J. D. Mackinlay, et B. Schneiderman. (1999). *Readings in Information Visualization: Using Vision to Think*. San Francisco (USA): Morgan Kaufmann.
- Card, S. K., P. Pirolli, et J. D. Mackinlay. (1994). The Cost-of-Knowledge Characteristic Function: Display Evaluation for Direct-Walk Dynamic Information Visualizations. In *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems - CHI '94*, p. 238-244. Boston (USA).
- Card, S. K., G. G. Robertson, et J. D. Mackinlay. (1991). The Information Visualizer: An Information Workspace. In *CHI'91, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 181-188. New Orleans (USA).
- Castner, H. (1983). Research Questions and Cartographic Design. In D. Taylor (Ed.), *Graphic*

- Communication and Design in Contemporary Cartography*, p. 87-112. John Wiley & Sons, Ltd.
- Catanas, M. (2002). L'expérimentation dans la recherche en sciences sociale. *cadredesante.com*. Consulté 16 juillet 2015, à l'adresse <http://www.cadredesante.com/spip/profession/recherche/L-experimentation-dans-la.html>
- Catrambone, R. et Richard. (1998). The subgoal learning model: Creating better examples so that students can solve novel problems. *Journal of Experimental Psychology: General* 127, 355-376.
- Cauvin, C., F. Escobar, et A. Serradji. (2007). *Cartographie Thématique 1: une nouvelle démarche*. Paris (France): Hermes Science Publications.
- Cauvin, C., F. Escobar, et A. Serradji. (2008a). *Cartographie Thématique 4: des transformations renouvelées*. Paris (France): Hermes Science Publications.
- Cauvin, C., F. Escobar, et A. Serradji. (2008b). *Cartographie Thématique 5: Des voies nouvelles à explorer*. Paris (France): Hermes Science Publications.
- Chapurlat, V. et S. Aloui. (2007). Une démarche intégrée pour l'ingénierie de système complexe face aux risques. In *7ème congrès international du génie industriel*, p. 11. Trois-Rivières (Canada).
- Chardonnel, S. (2014). Torsten Hägerstrand. *Hypergéô*. Consulté 1 septembre 2016, à l'adresse <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article540>
- Chazelle, B., L. Lambert, et C. Pams Capoccioni. (2012). La vulnérabilité des infrastructures face aux événements hydrologiques extrêmes : état des connaissances et gestion du risque. In SHF (Ed.), *Congrès SHF : «Evènements extrêmes fluviaux et maritimes»*, p. 9. Paris (France).
- Chesneau, É. (2006). *Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleur en cartographie. Application aux cartes de risques*. Université de Marne-la-Vallée (France).
- Cheyland, J.-P. (2007). Les processus spatio-temporels : quelques notions et concepts préalables à leur représentation. *M@ppemonde* 87, 1-21.
- Choquet, C. et S. Iksal. (2007). Modélisation et construction de traces d'utilisation d'une activité d'apprentissage : une approche langage pour la réingénierie d'un EIAH. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Education et la Formation (STICEF)* 14.
- Christophe, S. (2009). *Aide à la conception de légendes personnalisées et originales : proposition d'une méthode coopérative pour le choix des couleurs*. Université Paris-Est.
- Cleveland, W. S. et M. E. McGill. (1988). *Dynamic Graphics for Statistics*. Pacific Grove (CA, USA): Wadsworth and Brooks/Cole.
- Cliburn, D. C., J. J. Feddema, J. R. Miller, et T. A. Slocum. (2002). Design and evaluation of a decision support system in a water balance application. *Computers & Graphics* 26, 931-949.

- Coeur, D. (2003). *La maîtrise des inondations dans la plaine de Grenoble (XVIIe-XXe siècle) : enjeux techniques, politiques et urbains*. Grenoble II, Université Pierre-Mendès France.
- Coeur, D. et M. Lang. (2008). Use of documentary sources on past flood events for flood risk management and land planning. *Comptes Rendus - Geoscience* 340, 644-650.
- Cohn, A. G., B. Bennett, J. Gooday, et N. M. Gotts. (1997). Qualitative Spatial Representation and Reasoning with the Region Connection Calculus. *GeoInformatica* 1, 275-316.
- Çöltekin, A., S. I. Fabrikant, et M. Lacayo. (2010). Exploring the efficiency of users' visual analytics strategies based on sequence analysis of eye movement recordings. *International Journal of Geographical Information Science* 24, 1559-1575.
- Conrad, S. H., R. J. LeClaire, G. P. O'Reilly, et H. Uzunalioglu. (2006). Critical national infrastructure reliability modeling and analysis. *Bell Labs Technical Journal* 11, 57-71.
- Cooper, G., S. Tindall-Ford, P. Chandler, et J. Sweller. (2001). Learning by imagining. *Journal of Experimental Psychology: Applied* 7, 68-82.
- Craik, F. I. M. et R. S. Lockhart. (1972). Levels of processing: A framework for memory research. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior* 11, 671-684.
- CRED. (2009). EM-DAT General Classification. Consulté 27 février 2015, à l'adresse <http://www.emdat.be/classification>
- D'Ercole, R., S. Hardy, P. Metzger, J. Robert, et P. Gluski. (2012). Les dimensions spatiales et territoriales de la gestion de crise à Lima. *Vertigo* 12.
- Davies, C. (2015). Visualizing the Viewer. In *GeoVIS'15 Workshop*. La Grande Motte (France).
- Davoine, P.-A. (2014). *Contributions géomatiques pour la Gestion des Risques Naturels : modélisation, géovisualisation, acquisition*. Grenoble (France).
- Davoine, P.-A., H. Mathian, C. Saint-Marc, J.-Y. Blaise, et L. Kaddouri. (2015). The Visual Representations of Territorial Dynamics : Retrospective and Input from New Computing Environments. In *27th International Cartographic Conference (ICC 2015)*, p. 16. Rio de Janeiro (Brazil).
- Davoine, P.-A., B. Moisuc, J. Gensel, et A. Arnaud. (2009). GenGHIS : environnement pour le développement d'applications de géovisualisation à données géo-référencées multidimensionnelles. In *Festival International de Géographie*. Saint-Dié-des-Vosges.
- Davoine, P., C. Saint-Marc, A. Dimuro, T. Staudacher, M. Villanova-Oliver, et P. Boissier. (2012). Constructions cartographiques pour la caractérisation de l'aléa volcanologique du Piton de la Fournaise. In *SAGEO 2012*, p. 1-17. Liège (Belgique).
- De Runz, C. (2008). *Imperfection , temps et espace : modélisation , analyse et visualisation dans un SIG archéologique*. Université de Reims Champagne-Ardenne (France).
- de Saussure, F. (1916). *Cours de linguistique générale*. Paris (France): Editions Payot & Rivages.
- Delacroix, C. (2016). HISTOIRE (Histoire et historiens) - L'écriture de l'histoire. *Encyclopædia Universalis*. Consulté 24 mai 2016, à l'adresse

<http://www.universalis.fr/encyclopedie/histoire-histoire-et-historiens-l-ecriture-de-l-histoire/>

- Desimone, R. et J. Duncan. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual review of neuroscience* 18, 193-222.
- Dibiase, D., A. M. MacEachren, J. B. Krygier, et C. Reeves. (1992). Animation and the role of map design in scientific visualization. *Cartography and Geographic Information Systems* 19, 201-214.
- Dransch, D. (1993). Kartographische Animation. In D. Grunreich (Ed.), *Kartographische Schriften, Kartographie und Geo-Informationssysteme, Grundlagen, Entwicklungsstand und trends*, p. 3-15. Bonn (Germany): Kirschbaum Verlag.
- Duarte, N. (2010). *Resonate, Present visual stories that transform audiences*. Wiley.
- Dubos-Paillard, E. et D. Provitolo. (2012). Analysis of the 2011 Japan's triple disaster through an ontology of the domain of risk and disaster. In *Complex System and Design Management*, p. 14. Paris (France).
- Duchêne, C. (2004). *Généralisation par agents communicants : Le modèle CARTACOM. Application aux données topographiques en zone rurale*. Université Paris 6.
- Dukaczewski, D. (2005). Entities - Cartotropic Method of Selection of Static and Dynamic Variables for Temporal Cartographic Animations. In *22nd International Cartographic Conference (ICC'05)*. A Coruña (Spain).
- Dykes, J., A. M. MacEachren, et M.-J. Kraak. (2005). *Exploring Geovisualization*. Elsevier Ltd.
- Edsall, R. M. (2003). Design and usability of an enhanced geographic information system for exploration of multivariate health statistics. *The Professional Geographer* 55, 146-160.
- Edsall, R. M. et D. J. Peuquet. (1997). Graphical Query Techniques for Temporal GIS. In *ACSM/ASPRS 13th Annual Conference*, p. 182-189. Seattle (WA, USA).
- Egbert, S. L. et T. A. Slocum. (1992). EXPLOREMAP : An Exploration System for Choropleth Maps. *Annals of the Association of American Geographers* 82, 275-288.
- Egenhofer, M. J. et J. R. Herring. (1990). *Categorizing binary topological relations between regions, lines, and points in geographic databases*. Orono (ME, USA).
- Eurocontrol. (2012). Eurocontrol Wiki : ISO 19108, Geographic information - Temporal Schema. Consulté 4 mars 2015, à l'adresse http://im.eurocontrol.int/wiki/index.php/ISO_19108,_Geographic_Information_-_Temporal_schema
- EXCIMAP. (2007). *Handbook on good practices for flood mapping in Europe*.
- Fabrikant, S. I. (2005). Towards an Understanding of Geovisualization with Dynamic Displays : Issues and Prospects. In American Association for Artificial Intelligence (Ed.), *Reasoning with Mental and External Diagrams: Computational Modelling and Spatial Assistance*, p. 6-11. Stanford (CA, USA).
- Fabrikant, S. I. et K. Goldsberry. (2005). Thematic relevance and perceptual salience of

- dynamic geovisualization displays. In *22nd International Cartographic Conference (ICC'05)*. A Coruña (Spain).
- Fabrikant, S. I. et A. Lobben. (2009). Introduction: Special Issue on Cognitive Issues in Geovisualization. *Cartographica* 44, 139-143.
- Fabrikant, S. I., S. Rebich-Hespanha, N. Andrienko, G. Andrienko, et D. R. Montello. (2008). Novel Method to Measure Inference Affordance in Static Small-Multiple Map Displays Representing Dynamic Processes. *The Cartographic Journal* 45, 201-215.
- Fabrikant, S. I., S. Rebich-Hespanha, et M. Hegarty. (2010). Cognitively inspired and perceptually salient graphic displays for efficient spatial inference making. *Annals of the Association of American Geographers* 100, 13–29.
- Fabrikant, S. I., S. Rebich-Hespanha, D. R. Montello, G. Andrienko, et N. Andrienko. (2008). A visual analytics approach to evaluate inference affordance from animated map displays. In *GeoVA Workshop - GIScience 2008*, p. 1-7. Park City (Utah, USA).
- Favier, R. et A.-M. Granet-Abisset. (2005). *Récits et représentations des catastrophes depuis l'Antiquité*. Grenoble (France): CNRS-MSH-Alpes.
- Fayol, M. (2000). Comprendre et produire des textes écrits : l'exemple du récit. In M. Kail et M. Fayol (Eds.), *L'Acquisition du langage*, p. 183-214. Paris (France): PUF.
- Ferland, Y. (2000). Les défis théoriques posés à la cartographie mènent à la cognition. *Cybergeo*.
- Field, S. (2005). *Screenplay: The Foundations of Screenwriting*. Delta.
- Fish, C., K. P. Goldsberry, et S. Battersby. (2011). Change Blindness in Animated Choropleth Maps: An Empirical Study. *Cartography and Geographic Information Science* 38, 350-362.
- Fleurance, P. (2003). Cindyniques : les sciences du danger. *Séminaire « La conduite de projets complexes »*. Consulté 18 août 2016, à l'adresse <http://pfleurance.hautetfort.com/list/seminaire-8-la-conduite-de-projet-complexe/2183330439.pdf>
- Fuchs, S., K. Spachinger, W. Dorner, J. Rochman, et K. Serrhini. (2009). Evaluating cartographic design in flood risk mapping. *Environmental Hazards* 8, 52-70.
- Galton, F. (1863). *Meteorographica, or Methods of Mapping the Weather*. (Macmillan, Ed.).
- Gangemi, A. et P. Mika. (2003). Understanding the Semantic Web through Descriptions and Situations. In *2nd International Conference on Ontologies, Databases and Applications of SEMantics (ODBASE'03)*, p. 689–706. Catania (Italy).
- Garnham, A. et J. Oakhill. (1996). The Mental Model Theory of Language Comprehension. In B. K. Britton et A. C. Graesser (Eds.), *Models of Understanding Text*, p. 313-339.
- Gatalsky, P., N. Andrienko, et G. Andrienko. (2004). Interactive Analysis of Event Data Using Space-Time Cube. In *Proceedings of the 8th International Conference on Information Visualisation (IV'04)*, p. 145-152. London (UK).

- Gautier, J., P.-A. Davoine, et C. Cuntz. (2016). Helical time representation to visualize return-periods of spatio-temporal events. In *19th AGILE Conference on Geographic Information Science*. Helsinki (Finland).
- GeoNames. (2014). About GeoNames. Consulté 27 février 2015, à l'adresse <http://www.geonames.org/about.html>
- Gershon, N. D. (1998). Visualisation of an Imperfect World. *IEEE Computer Graphics and Applications* 18, 43-45.
- Gigerenzer, G. (2009). *Le génie de l'intuition: intelligence et pouvoirs de l'inconscient*. Belfond.
- Goldsberry, K. P., S. I. Fabrikant, et P. Kyriakidis. (2004). The Influence of Classification Choice on Animated Choropleth Maps. In *Annual Meeting of the North American Cartographic Society*. Portland (ME, USA).
- Golebiowska, I., T. Opach, et J. K. Rød. (2017). For your eyes only ? Evaluating a coordinated and multiple views tool with a map, a parallel coordinated plot and a table using an eye-tracking approach. *International Journal of Geographical Information Science* 31, 237-252.
- Goodchild, M. F. (2006). GIS and disasters: Planning for catastrophe. *Computers, Environment and Urban Systems* 30, 227-229.
- Google. (2012). Small Arms and Ammunition - Imports and Exports. Consulté 8 février 2016, à l'adresse <http://armsglobe.chromeexperiments.com/>
- Gotz, D. et M. X. Zhou. (2009). Characterizing users' visual analytics activity for insight provenance. *Information Visualization* 8, 42-55.
- Gould, P. et A. Bailly. (1995). *Le pouvoir des cartes. Brian Harley et la cartographie*. Paris (France): Economica.
- Grainger, J., J. K. O'Regan, A. M. Jacobs, et J. Segui. (1989). On the role of competing word units in visual word recognition: The neighborhood frequency effect. *Perception & Psychophysics* 45, 189-195.
- Grawitz, M. (2000). *Méthodes des sciences sociales*. Dalloz-Sirey.
- Graziano, M. (2009). *Sémiologie Graphique Expérimentale pour une Cartographie Efficace du Risque Inondation*. Université de Tours.
- Griethe, H. et H. Schumann. (2006). The visualization of uncertain data: Methods and problems. In *Simulation and Visualization*. Magdeburg (Germany).
- Griffin, A. L., A. M. Maceachren, F. Hardisty, E. Steiner, et B. Li. (2006). A Comparison of Animated Maps with Static Small-Multiple Maps for Visually Identifying Space-Time Clusters. *Annals of the Association of American Geographers* 96, 740-753.
- Gustave, G. et M. Pigeolet. (2015). *Carte mondiale des catastrophes et des risques naturels*.
- Hagemeyer-Klose, M. et K. Wagner. (2009). Evaluation of flood hazard maps in print and web mapping services as information tools in flood risk communication. *Natural Hazards and*

- Earth System Science* 9, 563-574.
- Hägerstrand, T. (1970). What about people in Regional Science? *Papers of the Regional Science Association* 24, 6-21.
- Hajji, H. (2005). *Gestion des risques naturels : Une approche fondée sur l'intégration des données*. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Hake, G. (1973). Kartographie und kommunikation. *Kartographische Nachrichten* 23, 137-148.
- Hall, R. (1998). Psychology World: Experimental Psychology. Consulté 3 juin 2015, à l'adresse <http://web.mst.edu/~psyworld/experimental.htm>
- Harley, J. B. (1988). Maps, knowledge and power. In D. Cosgrove et S. Daniels (Eds.), *The iconography of landscape: Essays on the symbolic representation, design and use of past environments*. New York (USA): Cambridge University Press.
- Harley, J. B. (1992). Deconstructing the Map. In T. Barnes et J. Duncan (Eds.), *Writing worlds: Discourse, Text and Metaphor in the Representation of Landscape*, p. 231-247. London (UK): Routledge.
- Harrower, M. (2007a). The Cognitive Limits of Animated Maps. *Cartographica* 42, 349-357.
- Harrower, M. (2007b). Unclassed Animated Choropleth Maps. *The Cartographic Journal* 44, 313-320.
- Healey, C. G., K. S. Booth, et J. T. Enns. (1995). High Speed Visual Estimation Using Preattentive Processing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 3, 107-135.
- Hegarty, M., S. Kriz, et C. Cate. (2003). The Roles of Mental Animations and External Animations in Understanding Mechanical Systems. *Cognition and Instruction* 21, 209-249.
- Heinrich, H. W. (1931). *Industrial Accident Prevention*. McGraw-Hill Book Company, inc.
- Henderson, J. M. et A. Hollingworth. (1998). Eye Movements During Scene Viewing: An Overview. In G. Underwood (Ed.), *Eye Guidance in Reading and Scene Perception: Eye Guidance while Reading and While Watching Dynamic Scenes*, p. 269–293. Oxford (UK): Elsevier.
- Hevern, V. W. (2004). Narrative psychology: Basics. *Narrative psychology: Internet and resource guide*. Le Moyne College Web site. Consulté 3 novembre 2016, à l'adresse <http://web.lemoyne.edu/~hevern/nr-basic.html>
- Hewitt, K. (1983). The Idea of Calamity in a Technocratic Age. In K. Hewitt (Ed.), *Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology*, p. 304. Boston (USA): Allen & Unwin.
- Ho, Q. et M. Jern. (2013). Geovisual Analytics and Storytelling Applied to a Flood Scenario. In *GeoViz 2013*, p. 3-4.
- Hutchins, E. (1996). *Cognition in the Wild*. Cambridge (MA, USA): MIT Press.

- Inkster, T. (2009). Linked Railway Data Project. Consulté 9 avril 2015, à l'adresse <http://ontologi.es/rail/#project>
- Interaction Design Foundation. (2016). Preattentive Visual Properties and How to Use Them in Information Visualization. Consulté 1 décembre 2016, à l'adresse <https://www.interaction-design.org/literature/article/preattentive-visual-properties-and-how-to-use-them-in-information-visualization>
- IPTC. (2008). *EventsML-G2, Specification Version 1.0*.
- ISO. (2002). ISO 19108:2002 Geographic Information - Temporal Schema. Consulté 3 avril 2015, à l'adresse http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=26013
- ISO/Technical Committee 204. (2011). *ISO 14825:2011, Intelligent transport systems - GDF 5.0*.
- ISO/Technical Committee 211. (2013). ISO 19157 : Information géographique - Qualité des données. Consulté 13 janvier 2015, à l'adresse http://www.iso.org/iso/fr/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=32575
- Itten, J. (1961). *Farbkreis*.
- Itti, L. et C. Koch. (2001). Computational modelling of visual attention. *Nature Reviews Neuroscience* 2, 194–203.
- Itti, L., C. Koch, et E. Niebur. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20, 1254-1259.
- Jacquinod, F. et J. Langumier. (2010). Géovisualisations 3D en action dans l'aménagement du territoire. *Géocarrefour* 303-311.
- Jakobson, R. (1960). Closing statements : Linguistics and Poetics. In T. A. Sebeok (Ed.), *Style in language*. New York (USA): Wiley.
- Jänicke, S., C. Heine, R. Stockmann, et G. Scheuermann. (2012). Comparative Visualization of Geospatial-Temporal Data. In *3rd International Conference on Information Visualization Theory and Applications, IVAPP 2012*, p. 613–625. Rome (Italy).
- Jansen, B. J. (2008). The methodology of search log analysis. In *Handbook of research on Web log analysis*, p. 100-123.
- Jégou, L. (2007). La troisième dimension en cartographie statistique, des cartes en prismes imprimées aux modèles 3D interactifs. *Mappemonde* 86.
- Jégou, L. (2013). *Vers une nouvelle prise en compte de l'esthétique dans la composition de la carte thématique : propositions de méthodes et d'outils*.
- Jégou, L. et J.-P. Deblonde. (2012). Vers une visualisation de la complexité de l'image cartographique. *Cybergeog : European Journal of Geography*.

- Jerding, D. F. et J. T. Stasko. (1995). Using Information Murals in Visualization Applications. In *UIST'95, ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, p. 73-74. Pittsburgh (USA).
- Jeung, H., P. Chandler, et J. Sweller. (1997). The Role of Visual Indicators in Dual Sensory Mode Instruction. *Educational Psychology* 17, 329-345.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Perceptual Psychophysics* 14, 201-211.
- Johnson-Laird, P. N. (1980). Mental models in cognitive science. *Cognitive science* 4, 71-115.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness*. Harvard University Press.
- Joliveau, T. (2010). Le Géoweb pour les nuls. Consulté 9 janvier 2017, à l'adresse <https://mondegeonumerique.wordpress.com/2010/06/24/le-geoweb-pour-les-nuls/>
- Kaddouri, L., J.-Y. Blaise, P.-A. Davoine, H. Mathian, et C. Saint-Marc. (2014). *État des lieux des Représentations Dynamiques des Temporalités des Territoires*.
- Kaempfer, J. et R. Micheli. (2005). La temporalité narrative. Ambroise Barras. Consulté 2 novembre 2016, à l'adresse <https://www.unige.ch/lettres/framo/enseignements/methodes/tnarrative/>
- Kafalenos, E. (2006). *Narrative Causalities*. Columbus (OH, USA): University Press.
- Keates, J. S. (1996). *Understanding maps*. Longman Glasgow, Addison Wesley.
- Keim, D. A. (2002). Information Visualization and Visual Data Mining. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*.
- Keim, D. A., C. Panse, et M. Sips. (2005). Information Visualization: Scope, Techniques and Opportunities for Geovisualization. In J. Dykes, A. M. MacEachren, et M.-J. Kraak (Eds.), *Exploring Geovisualization*. Elsevier.
- Kervern, G.-Y. et P. Boulenger. (2007). *Cindynique : Concepts et mode d'emploi*. Paris (France): Economica.
- Khalil, M. K., F. G. W. C. Paas, T. E. Johnson, et A. F. Payer. (2005). Design of interactive and dynamic anatomical visualizations: The implication of cognitive load theory. *The Anatomical Record (Part B: New Anatomist)* 286, 15-20.
- Kinkeldey, C., A. M. Maceachren, et J. Schiewe. (2014). How to Assess Visual Communication of Uncertainty? A Systematic Review of Geospatial Uncertainty Visualisation User Studies. *The Cartographic Journal* 51, 372-386.
- Klein, O. (2007). *Modélisation et représentation spatio-temporelles des déplacements quotidiens urbains*. Université Louis Pasteur, Strasbourg (France).
- Köbben, B. et M. Yaman. (1995). Evaluating Dynamic Visual Variables. In F. Ormeling (Ed.), *Seminar on Teaching Animated Cartography*, p. 45-53. Madrid (Spain): International Cartographic Association.

- Koláčný, A. (1969). Cartographic Information—a Fundamental Concept and Term in Modern Cartography. *The Cartographic Journal* 6, 47-49.
- Kollarits, S. et N. Wergles. (2009). *MONITOR - an ontological basis for risk management*.
- Köpf, H. (2010). *InteGRail - Publishable Final Activity Report*.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and Brain: The Resolution of the Imagery Debate*. Cambridge (MA, USA): MIT Press.
- Koussoulakou, A. et M.-J. Kraak. (1992). Spatia-temporal maps and cartographic communication. *The Cartographic Journal* 29, 101-108.
- Kraak, M.-J. (2003). The Space-Time Cube revisited from a Geovisualization Perspective. In *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference (ICC)*, p. 1988-1996. Durban (South Africa).
- Kraak, M.-J., R. M. Edsall, et A. M. MacEachren. (1997). Cartographic Animation and Legends for Temporal Maps: Exploration and or Interaction. In *Proceedings of the 18th International Cartographic Conference (ICC)*, p. 253-260. Stockholm (Sweden).
- Kraak, M.-J. et A. Klomp. (1995). A Classification of Cartographic Animations: Towards a Tool for the Design of Dynamic Maps in a GIS Environment. In International Cartographic Association (Ed.), *Seminar Teaching Animated Cartography, Escuela Universitaria de Ingeniera Tecnica Topografica*. Madrid (Spain).
- Kraak, M.-J. et F. Ormeling. (1996). *Cartography: visualization of spatial data*, 1^{re} éd. Addison Wesley Longman.
- Kraak, M.-J. et F. Ormeling. (2011). *Cartography: visualization of spatial data*, 3^e éd. New York (USA): Guilford Press.
- Kraak, M. J. (2013). A Cartographer, Shaped by Context and Challenged by Classics. *The Cartographic Journal* 50, 112-116.
- Kruchten, P., C. Woo, K. Monu, et M. Sotoodeh. (2007). A Human-Centered Conceptual Model of Disasters Affecting Critical Infrastructures. In B. Van de Walle, P. Burghardt, et C. Nieuwenhuis (Eds.), *Proceedings of the 4th International ISCRAM Conference*, p. 19. Delft (Netherlands).
- Kubíček, P., T. Ludík, E. Mulíčková, J. Ráček, et G. Šafr. (2010). Process Support and Adaptive Geovisualisation in Emergency Management. In *Geographic Information and Cartography for Risk and Crisis Management*, p. 335-347. Springer Berlin Heidelberg.
- L'Hostis, A. (2003). De l'espace contracté à l'espace chiffonné. Apports de l'animation à la cartographie en relief des distances-temps modifiées par les réseaux de transport rapides. *Revue Internationale de Géomatique* 13, 69-80.
- Ladenthin, B. (2008). Points d'un cube imaginaire. *Wikipedia*. Consulté 28 novembre 2016, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Psychologie_de_la_forme
- Lagoze, C. et J. Hunter. (2001). The ABC Ontology and Model. *Journal of Digital Information (JoDI)* 2.

- Lang, M. et D. Coeur. (2014). *Les inondations remarquables en France*. Quae.
- Lansdale, M., G. Underwood, et C. Davies. (2010). Something Overlooked? How experts in change detection use visual saliency. *Applied Cognitive Psychology* 24, 213-225.
- Larkin, J. H. et H. A. Simon. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science* 11, 65-99.
- Lasseter, J. (1987). Principles of Traditional Animation Applied to 3D Computer Animation. *Computer Graphics (SIGGRAPH 87)* 21, 35-44.
- Lavandier, Y. (1994). *La Dramaturgie*. Le Clown & l'Enfant.
- Le Bourhis, J.-P. (2007). Du savoir cartographique au pouvoir bureaucratique. Les cartes des zones inondables dans la politique des risques (1970-2000). *Genèses* 68, 75-96.
- Le Fur, A. (2007). *Pratiques de la cartographie*, 2ème édit. Paris (France): Armand Colin.
- Le Moigne, J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes*. Dunod.
- Ledoux, B. (2006). *La gestion du risque inondation*. Lavoisier.
- Lee, P. U., A. Klippel, et H. Tappe. (2003). The Effect of Motion in Graphical User Interfaces. *Lecture Notes in Computer Science* 2733, 12-21.
- Légal, J.-B. (2010). *Quelques rappels concernant la méthode expérimentale*.
- Lienert, C., R. Weingartner, et L. Hurni. (2011). An interactive, web-based, real-time hydrological map information system. *Hydrological Sciences Journal* 56, 1-16.
- Lieury, A. (2004). *Psychologie cognitive: cours et exercices*. Paris (France): Dunod.
- Lindell, M. K. et C. S. Prater. (2003). Assessing Community Impacts of Natural Disasters. *Natural Hazards Review* 4, 176-185.
- Liu, S., C. Brewster, et D. Shaw. (2013). Ontologies for Crisis Management : A Review of State of the Art in Ontology Design and Usability. In T. Comes, F. Fiedrich, S. Fortier, J. Geldermann, et L. Yang (Eds.), *Proceedings of the 10th International ISCRAM Conference*, p. 10. Baden-Baden (Germany).
- Lloyd, R. (1997). Visual Search Processes Used in Map Reading. *Cartographica* 34, 11-32.
- Lodemann, M. et N. Luttenberger. (2010). Ontology-Based Railway Infrastructure Verification, Planning Benefits. In *International Conference on Knowledge Management and Information Sharing - KMIS 2010*. Valencia (Spain).
- Lorenz, B., H. J. Ohlbach, et L. Yang. (2005). *Ontology of Transportation Networks*. Munich (Germany).
- Lowe, R. K. (1999). Extracting Information from an Animation During Complex Visual Learning. *European Journal of Psychology Education* 14, 225-244.
- Lu, J., C. Roberts, K. Lang, A. Stirling, et K. Madelin. (2006). The Application of Semantic Web Technologies for Railway Decision Support. In J. N. D. Gupta, G. A. Forgionne, et M. Mora T. (Eds.), *Intelligent Decision-making Support Systems: Foundations, Applications*

- and Challenges*, p. 321-337. London: Springer-Verlag.
- Lussault, M. (2003). L'espace avec les images. In B. Debarbieux et S. Lardon (Eds.), *Les figures du projet territorial*.
- MacEachren, A. M. (1995). *How maps work: Representation, Visualization and Design*. New York (NY, USA): The Guilford Press.
- Maceachren, A. M. et M.-J. Kraak. (1997). Exploratory cartographic visualization: Advancing the agenda. *Computers & Geosciences* 23, 335-343.
- MacEachren, A. M., R. E. Roth, J. O'Brien, B. Li, D. Swingley, et M. Gahegan. (2012). Visual Semiotics & Uncertainty Visualization: An Empirical Study. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 18, 2496-2505.
- MacEachren, A. M. et D. R. F. Taylor. (1994). *Visualization in Modern Cartography*. Pergamon Press, Inc.
- Mackinlay, J. D., G. G. Robertson, et S. K. Card. (1991). The Perspective Wall: Detail and Context Smoothly Integrated. In *CHI'91, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 173-180. New York (USA).
- Maggi, S., S. I. Fabrikant, J. Imbert, C. Hurter, S. Maggi, S. I. Fabrikant, et al. (2016). How Do Display Design and User Characteristics Matter in Animations? An Empirical Study with Air Traffic Control Displays. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 2-14.
- Maggi, S. M. R. et S. I. Fabrikant. (2014). Embodied Decision Making with Animations. In *GIScience 2014*. Vienna (Austria).
- Mandler, J. M. et N. S. Johnson. (1977). Remembrance of things parsed: Story structure and recall. *Cognitive psychology* 9, 111-151.
- Mandran, N., É. Chesneau, et C. Cuntty. (2013). Perception et mémorisation des cartes animées: retour d'expérience sur un protocole d'évaluation. In *Sageo 2013*. Brest (France).
- Marey, E. J. (1885). *La méthode graphique*. Paris (France).
- Martinais, E. (2007). La cartographie au service de l'action publique. L'exemple de la gestion des risques industriels. *EspaceTemps.net*.
- Massey, D. B. (2005). *For Space*. London (UK): SAGE.
- Mateas, M. et P. Sengers. (2003). *Narrative Intelligence*. John Benjamins edition.
- McDonald, J. A. (1990). Painting Multiple Views of Complex Objects. In *ECOOP/OOPLSIA'90*, p. 245-257.
- Merz, B., A. H. Thielen, et M. Gocht. (2007). Flood Risk Mapping At The Local Scale: Concepts and Challenges. In S. Begum, M. J. F. Stive, et J. W. Hall (Eds.), *Flood Risk Management in Europe*, p. 231-251. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Météo France, . (2014). Pluies extrêmes en France métropolitaine et outre-mer. Consulté 9

- août 2016, à l'adresse <http://pluiesextremes.meteo.fr/>
- Meyer, D. E. et R. W. Schvaneveldt. (1971). Facilitation in recognizing pairs of words: evidence of a dependence between retrieval operations. *Journal of Experimental Psychology* 90.
- Meyer, V., C. Kuhlicke, J. Luther, S. Fuchs, S. Priest, et W. Dorner. (2012). Recommendations for the user-specific enhancement of flood maps. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences* 56, 1701-1716.
- Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity of processing information. *Psychological Review* 63, 81-97.
- Minard, C. J. (1869). Carte figurative des pertes successives en hommes de l'armée française dans la campagne de Russie, 1812-1813. ENPC.
- Moffat, A., P. Thomas, et F. Scholer. (2013). Users Versus Models : What Observation Tells Us About Effectiveness Metrics. In *CIKM '13*. San Francisco (USA): ACM.
- Mohan, R. et G. Arumugam. (2005). Constructing Railway Ontology using Web Ontology Language and Semantic Web Rule Language. *International Journal of Computer Technology and Applications* 2, 314-321.
- Moisuc, B., P.-A. Davoine, J. Gensel, et H. Martin. (2005). GenGHIS : Un outil de modélisation spatio-temporelle pour le suivi historique des risques naturels. *Ingénierie des systèmes d'information* 10, 35-58.
- Molino, J. et R. Lafhail-Molino. (2004). Le récit, un mécanisme universel. *Sciences Humaines* 148.
- Moreno, R. et R. E. Mayer. (1999). Cognitive principles of multimedia learning: The role of modality and contiguity. *Journal of Educational Psychology* 91, 358-368.
- Morita, T. (1991). The measurement of eye movements for map design evaluation : Legibility of quantitative symbols. In *15th Meeting of the International Cartographic Association*.
- Morris, C., J. M. Easton, et C. Roberts. (2015). Ontology in the Rail Domain: The Railway Core Ontologies. In *7th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management - IC3K 2015*, p. 285-290. Lisbon (Portugal).
- Mousavi, S. Y., R. Low, et J. Sweller. (1995). Reducing cognitive load by mixing auditory and visual presentation modes. *Journal of Educational Psychology* 87, 319-334.
- Muehrcke, P. C. (1978). *Map Use : Reading, Analysis and Interpretation*. Madison (USA): JP Publications.
- Munzner, T. (2008). Process and pitfalls in writing information visualization research papers. *Lecture Notes in Computer Science* 4950, 134-153.
- Naulet, R. (2002). *Utilisation de l'information des crues historiques pour une meilleure prédétermination du risque d'inondation. Application au bassin de l'Ardèche à Vallon Pont-d'Arc et St-Martin d'Ardèche*. Université Joseph Fourier - Grenoble.
- Nicolas, S., V. Gyselinck, D. Vergilino-perez, et K. Doré-Mazars. (2007). *Introduction à la psychologie cognitive*. In-Press.

- Norman, D. A. (1991). Cognitive Artifacts. In J. Carroll (Ed.), *Designing Interaction*. New York (NY, USA): Cambridge University Press.
- Norman, D. A. (1993). Things that make us smart: defending human attributes in the age of the machine.
- North, J. S., A. M. Williams, N. Hodges, P. Ward, et K. A. Ericsson. (2009). Perceiving patterns in dynamic action sequences: Investigating the processes underpinning stimulus recognition and anticipation skill. *Applied Cognitive Psychology* 23, 878-894.
- OGC. (2012). *OGC GeoSPARQL - A Geographic Query Language for RDF Data*.
- OMG. (2015). *Unified Modeling Language, version 2.5*.
- Ooms, K. et P. De Maeyer. (2015). Georeferencing eye tracking data on interactive cartographic products. In *27th International Cartographic Conference (ICC 2015)*. Rio de Janeiro (Brazil).
- Opach, T., I. Golebiowska, et S. I. Fabrikant. (2014). How Do People View Multi-Component Animated Maps? *The Cartographic Journal* 51, 330-342.
- Opach, T. et J. K. Rød. (2013). Cartographic visualization of vulnerability to natural hazards. *Cartographica* 48, 113-125.
- Ormeling, F. (1995). Teaching Animated Cartography. In International Cartographic Association (Ed.), *Seminar Teaching Animated Cartography, Escuela Universitaria de Ingeniera Tecnica Topografica*. Madrid (Spain).
- Paas, F. G. W. C., A. Renkl, et J. Sweller. (2003). Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational Psychology* 38, 1-4.
- Paas, F. G. W. C., J. E. Tuovinen, H. Tabbers, et P. W. M. Van Gerven. (2003). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational psychologist* 38, 63-71.
- Paas, F. G. W. C. et J. J. G. Van Merriënboer. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of Educational Psychology* 86, 122-133.
- Palka, G. (2015). *Amélioration de la cartographie du risque d'inondation par l'intégration des besoins et préférences des destinataires*. Université François Rabelais de Tours.
- Palsky, G. (1996). *Des chiffres et des cartes. La cartographie quantitative au XIX e siècle. Mémoire de la section de géographie*, Vol. 19. Paris (France): Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Comité des travaux historiques et scientifiques.
- Palsky, G. (2014). La carte : définition. *Hypergeo*. Consulté 11 août 2016, à l'adresse <http://www.hypergeo.eu/spip.php?article266>
- Pandey, A. V., A. Manivannan, O. Nov, M. Satterthwaite, et E. Bertini. (2014). The Persuasive Power of Data Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 20, 2211-2220.

- Pang, A. T. (2008). Visualizing Uncertainty in Natural Hazards. *Risk Assessment, Modeling and Decision Support* 14, 261-294.
- Panofsky, E. (1939). *Studies in iconology: humanistic themes in the art of the Renaissance*. Oxford (UK): Oxford University Press.
- Parlement Européen et Conseil. (2007). Directive 2007/60/CE du Parlement Européen et du Conseil du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. *Journal Officiel de l'Union Européenne L 288*, 27-34.
- Peterson, M. P. (1994). Spatial visualization through cartographic animation: theory and practice. In *Proceedings of Geographic Information Systems / Land Information Systems (GIS/LIS)*, p. 250-258.
- Peterson, M. P. (1995). Interactive and Animated Cartography.
- Peterson, M. P. (1999). Active legends for interactive cartographic animation. *International Journal of Geographical Information Science* 13, 375-383.
- Pinker, S. (1990). A theory of graph comprehension. In *Artificial intelligence and the future of testing*, p. 73-126.
- Pirolli, P. et S. K. Card. (1995). Information Foraging in Information Access Environments. In *CHI'95, ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, p. 51-58. New York (NY, USA).
- Pollock, E., P. Chandler, et J. Sweller. (2002). Assimilating complex information. *Learning and Instruction* 12, 61-86.
- Pomerantz, J. R. (1983). Global and local precedence: Selective attention in form and motion perception. *Journal of Experimental Psychology: General* 112, 516-540.
- Pornon, H. (1992). *Les SIG, mise en oeuvre et applications*. Paris (France): Hermes Science Publications.
- PRIM. (2009a). Définition générale du risque majeur. Consulté 16 février 2015, à l'adresse <http://www.risquesmajeurs.fr/definition-generale-du-risque-majeur>
- PRIM. (2009b). Glossaire Risques Majeurs. Consulté 16 février 2015, à l'adresse <http://www.risquesmajeurs.fr/glossaire-risques-majeurs>
- Propeck-Zimmermann, E. et T. Saint-Gerand. (2001). Modélisation cartographique des RTM : de la connaissance du risque à sa gestion ou visualiser le risque dans un SIG pour l'objectiver. In *Colloque international Risques et Territoires*. Vaulx-en-Velin (France).
- Provitolo, D. (2005). Un exemple d'effets de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines. *Cybergeo : European Journal of Geography* 19.
- Provitolo, D. (2012). La résilience des villes exposées aux risques et les comportements humains face aux catastrophes urbaines. In *Les entretiens du CERTU, Métropolisation et nouvelles urbanités, Atelier Vulnérabilités urbaines*. Lyon (France).
- Provitolo, D., J.-P. Müller, et E. Dubos-Paillard. (2009). Vers une ontologie des risques et des catastrophes : le modèle conceptuel. In *Actes des 16e Rencontres Interdisciplinaires sur*

- les Systèmes Complexes Naturels et Artificiels*, p. 16. Rochebrune (France).
- Raimond, Y. et S. Abdallah. (2007a). The Event Ontology. Consulté 5 janvier 2017, à l'adresse <http://motools.sourceforge.net/event/event.html>
- Raimond, Y. et S. Abdallah. (2007b). The Timeline Ontology. Consulté 4 mars 2015, à l'adresse <http://motools.sourceforge.net/timeline/timeline.html>
- Rejeski, D. (1993). GIS and risk : a three-culture problem. *Environmental modeling with GIS* 318-331.
- Renkl, A. (1997). Learning from Worked-Out Examples: A Study on Individual Differences. *Cognitive Science* 21, 1-29.
- Rensink, R. A. (2002). Internal vs. External Information in Visual Perception. In *Second International Symposium on Smart Graphics*, p. 63-70. Hawthorne (NY, USA).
- Rensink, R. A., J. K. O'Regan, et J. J. Clark. (1997). To See or Not to See: The Need for Attention to Perceive Changes in Scenes. *Psychological Science* 8, 368-373.
- Resnikoff, H. L. (1987). *The Illusion of Reality*. New York (NY, USA): Springer-Verlag.
- Rieber, L. P. (1991a). Animation, incidental learning, and continuing motivation. *Journal of Educational Psychology* 83, 318-328.
- Rieber, L. P. (1991b). Effects of visual grouping strategies of computer-animated presentations on selective attention in science. *Educational Technology Research and Development* 39, 5-15.
- Robertson, G. G., R. Fernandez, D. Fisher, B. Lee, et J. Stasko. (2008). Effectiveness of animation in trend visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 14, 1325-32.
- Roszak, T. (1972). *Where the Wasteland Ends: Politics and Transcendence in Post-industrial Society*. New York (USA): Doubleday.
- Rouleau, B. (1991). *Méthodes de la cartographie*. Paris (France): Presses du CNRS.
- Rowe, G. et L. J. Frewer. (2000). Public Participation Methods: A Framework for Evaluation. *Science, Technology & Human Values* 25, 3-29.
- Ruas, A. (1999). *Modèle de généralisation de données géographiques à base de contraintes et d'autonomie*. Université de Marne-la-Vallée.
- Rubin, E. (1921). *Visuell Wahrgenommene Figuren : Studien in psychologischer Analyse*. Copenhagen (Danemark): Gyldendalske boghandel.
- Saint-Marc, C., P.-A. Davoine, M. Lang, D. Coeur, et M. Villanova-Oliver. (2015). Cartographical Approaches to Visualize Overlapped Locations of Major Historical Floods on Territories. In *27th International Cartographic Conference (ICC 2015)*, p. 10. Rio de Janeiro (Brazil).
- Saint-Marc, C., P.-A. Davoine, et M. Villanova-Oliver. (2014). Methods for mapping volcanic events overlaid across time. *Journal of Maps* 10, 249-256.
- Saint-Marc, C., M. Villanova-Oliver, C. Pams Capoccioni, D. Chenier, et P.-A. Davoine. (2016).

- Representation and Visualization of Imperfect Geohistorical Data about Natural Risks: A Qualitative Classification and its Experimental Assessment. In *Agile 2016*, p. 21. Helsinki (Finland).
- Salthouse, T. A. (2009). When does age-related cognitive decline begin? *Neurobiology of aging* 30, 507-514.
- Sarkar, M., H. M. Brown, et S. Hyder. (2013). Fisheye View. Consulté 7 janvier 2017, à l'adresse http://www.infovis-wiki.net/index.php?title=Fisheye_View
- Saval, A., M. Bouzid, et S. Brunessaux. (2009). Vers une modélisation spatiale et sémantique pour l'interprétation des risques. In D. Phan (Ed.), *7ème rencontres interdisciplinaires sur les systèmes complexes naturels et artificiels*. Rochebrune (France).
- Schank, R. et R. Abelson. (1977). *Scripts, Plans and Understanding*. Lawrence Erlbaum edition.
- Scherp, A., T. Franz, C. Saathoff, et S. Staab. (2009). F - A Model of Events based on the Foundational Ontology DOLCE+ Ultra Light. In *5th International Conference on Knowledge Capture (K-CAP'09)*. Redondo Beach (CA, USA).
- Scheuer, S., D. Haase, et V. Meyer. (2013). Towards a flood risk assessment ontology - Knowledge integration into a multi-criteria risk assessment approach. *Computers, Environment and Urban Systems* 37, 82-94.
- Schneiderman, B. (1996). The Eyes Have It: A Task by Data Type Taxonomy for Information Visualization. In *IEEE Workshop on Visual Languages'96*, p. 336-343.
- Schwan, S. et R. Riempp. (2004). The cognitive benefits of interactive videos: Learning to tie nautical knots. *Learning and Instruction* 14, 293-305.
- Serrhini, K. (2000). *Évaluation spatiale de la covisibilité d'un aménagement. Sémiologie graphique expérimentale et modélisation quantitative*. CESA.
- Shannon, C. E. et W. Weaver. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana (USA): University of Illinois Press.
- Shiffrin, R. M. et W. Schneider. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review* 84.
- Shiple, T. F. (2003). The effect of object and event orientation on perception of biological motion. *Psychological Science* 14, 377-380.
- Shiple, T. F., S. I. Fabrikant, et A.-K. Lautenschütz. (2013). Creating Perceptually Salient Animated Displays of Spatiotemporal Coordination in Events. In M. Raubal, D. M. Mark, et A. U. Frank (Eds.), *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space: New Perspectives on Geographic Information Research*, p. 259-270. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Skeels, M., B. Lee, G. Smith, et G. G. Robertson. (2008). Revealing uncertainty for information visualization. In *Working conference on Advanced Visual Interfaces - AVI '08*, p. 376-379. Napoli (Italy): ACM Press.

- Slocum, T. A., C. Block, B. Jiang, A. Koussoulakou, D.-R. Montello, S. Fuhrmann, et N.-R. Hedley. (2001). Cognitive and usability issues in geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science* 28, 61-75.
- Slocum, T. A., S. H. Robeson, et S. L. Egbert. (1990). Traditional Versus Sequenced Choropleth Maps: An Experimental Investigation. *Cartographica* 27, 67-88.
- Slocum, T. A., R. S. Sluter, F. Kessler, et S. Yoder. (2004). A Qualitative Evaluation of MapTime, A Program For Exploring Spatiotemporal Point Data. *Cartographica* 39, 43-68.
- Slocum, T. A., S. C. Yoder, F. C. Kessler, et R. S. Sluter. (2000). MapTime: software for exploring spatiotemporal data associated with point locations. *Cartographica* 57, 15-31.
- Smets, P. (1997). Imperfect information : Imprecision - Uncertainty. In P. Smets et A. Motro (Eds.), *Uncertainty Management in Information Systems. From Needs to Solutions.*, p. 225-254. Kluwer Academic Publishers.
- Smith, A. R. (1978). Color Gamut Transform Pairs. *Computer Graphics* 12.
- Snoussi, M., J. Gensel, et P.-A. Davoine. (2012). Extending TimeML and SpatialML languages to handle imperfect spatio-temporal information in the context of natural hazards studies. In J. Gensel, D. Josselin, et D. Vandenbroucke (Eds.), *AGILE'2012 International Conference on Geographic Information Science*, p. 117-122. Avignon (France): Springer-Verlag.
- Spaccapietra, S., C. Parent, et E. Zimányi. (2007). Spatio-temporal and Multi-representation Modeling: A Contribution to Active Conceptual Modeling. In P. P. Chen et L. Y. Wong (Eds.), *Active Conceptual Modeling of Learning*, Vol. 4512, p. 194-205. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive science* 12, 257-285.
- Sweller, J. et P. Chandler. (1991). Evidence for cognitive load theory. *Cognition and Instruction* 8, 351-362.
- Takatsuka, M. et M. Gahegan. (2002). GeoVISTA Studio: a codeless visual programming environment for geoscientific data analysis and visualization. *Computers & Geosciences* 28, 1131-1144.
- Tate, E., C. G. Burton, M. Berry, C. T. Emrich, et S. L. Cutter. (2011). Integrated Hazards Mapping Tool. *Transactions in GIS* 15, 689-706.
- Thomson, J., E. Hetzler, A. M. MacEachren, M. Gahegan, et M. Pavel. (2005). A typology for visualizing uncertainty. In R. F. Erbacher, J. C. Roberts, M. T. Grohn, et K. Borner (Eds.), *SPIE, Visualization and Data Analysis 2005*, Vol. 2005, p. 146-157. San Jose (CA, USA): SPIE.
- Tierney, K. J., M. K. Lindell, et R. W. Perry. (2001). *Facing the Unexpected: Disaster Preparedness and Response in the United States*. Washington D.C. (USA): Joseph Henry Press.
- Tobler, W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic*

Geography 46.

- Tobón, C. (2005). Evaluating geographic visualization tools and methods: an approach and experiment based upon user tasks. In J. Dykes, A. M. MacEachren, et M.-J. Kraak (Eds.), *Exploring Geovisualization*, p. 645-666. Amsterdam (The Netherlands): Elsevier.
- Tominski, C. et H. Schumann. (2008). Enhanced Interactive Spiral Display. In *Proceedings of the Annual SIGRAD Conference*, p. 53-56. Stockholm (Sweden).
- Trabasso, T. et L. L. Sperry. (1985). Causal relatedness and importance of story events. *Journal of Memory and Language 24*, 595-611.
- Treisman, A. (1986). Features and Objects in Visual Processing. *Scientific American*.
- Troje, N. F. (2002). Decomposing biological motion: a framework for analysis and synthesis of human gait patterns. *Journal of Visualisation 2*, 371-387.
- Troncy, R., R. Shaw, et L. Hardman. (2010). LODÉ: une ontologie pour représenter des événements dans le web des données. In *21ème Journées Francophones d'Ingénierie des Connaissances (IC'2010)*, p. 19. Nîmes (France).
- Tuffield, M. M., D. E. Millard, et N. R. Shadbolt. (2006). Ontological Approaches to Modelling Narrative. In *Proceedings of the 2nd AKT Doctoral Symposium (Advanced Knowledge Technologies)*, p. 62-69.
- Tufte, E. R. (1983). *The Visual Display of Quantitative Information*. Cheshire (CT, USA): Graphics Press.
- Tufte, E. R. (1990). *Envisioning Information*. Cheshire (CO, USA): Graphic Press.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory Data Analysis*. Reading (MA, USA): Addison-Wesley.
- Tutcher, J., J. M. Easton, et C. Roberts. (2015). Enabling Data Integration in the Rail Industry Using RDF and OWL: The RaCoOn Ontology. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering F4015001*.
- Tversky, B., J. B. Morrison, et M. Betrancourt. (2002). Animation : can it facilitate ? *International journal of human-computer studies 247-262*.
- Umiliacchi, P. et U. Henning. (2008). Standardized Data Interchange Between Railway Systems: an Integrated Railway Information System. In *WCRR 2008*. Seoul (Korea).
- Ushold, M. et M. Gruninger. (1996). Ontologies: principles, methods and applications. *Knowledge engineering review 11*, 93-155.
- Ushold, M. et M. Gruninger. (2004). Ontologies and semantics for seamless connectivity. *Journal of SIGMOD Rec. 33*, 58-64.
- Van Merriënboer, J. J. G., P. A. Kirschner, et L. Kester. (2003). Taking the Load Off a Learner's Mind: Instructional Design for Complex Learning. *Educational Psychologist 38*, 5-13.
- Vangenot, C., C. Parent, et S. Spaccapietra. (2002). Modélisation et manipulation de données spatiales avec multireprésentation dans le modèle MADS ». , *Traité Information Géographique et Aménagement du T*. In *Généralisation et Représentation Multiple*.

- Traité IGAT, Hermès.
- Vasiliev, I. (1997). Mapping Time. *Cartographica* 34, 1-51.
- Veyret, Y. (2004). *Les risques*. Paris (France): Bréal.
- Villanova-Oliver, M. et S. Christophe. (2014). Cartographie & Cognition. *Action Prospective du Groupement de Recherche MAGIS*. Consulté 24 novembre 2016, à l'adresse <http://gdr-magis.imag.fr/index.php/aps-methodologiques/52-ap/161-cartographie-cognition>
- Villanova-Oliver, M., A. Hombiat, C. Saint-Marc, P.-A. Davoine, et J. Gensel. (2013). Capitalisation de l'information géo-historique dans le cadre de la Directive Inondation. In *Sageo 2013*. Brest (France).
- W3C. (2006). Time Ontology in OWL. Consulté 4 mars 2015, à l'adresse <http://www.w3.org/TR/2006/WD-owl-time-20060927>
- W3C. (2015). OWL Web Ontology Language Current Status. Consulté 4 mars 2014, à l'adresse http://www.w3.org/standards/techs/owl#w3c_all
- Ware, C. (2004). *Information Visualization: Perception for Design*, 2^e éd. San Francisco (CA, USA): Morgan Kaufmann.
- Weber Reuschel, A.-K., B. Piatti, et L. Hurni. (2014). Data-driven Expansion of Dense Regions: A Cartographic Approach in Literary Geography. *The Cartographic Journal* 51, 123-140.
- Weger. (1996). *Cartographie : la couleur*.
- Wehrend, S. et C. Lewis. (1990). A problem-oriented classification of visualization techniques. In *Proceedings of the 1st IEEE Conference on Visualization*, p. 139-143. San Francisco (CA, USA).
- Weiss, K. et I. Richard. (2013). Editorial. In CEPRI (Ed.), *Sensibiliser les populations exposées au risque d'inondation : comprendre les mécanismes du changement de la perception et du comportement*, p. 3.
- Wertheimer, M. (1912). *Etudes expérimentales sur la perception du mouvement*.
- Wiener, N. (1961). Cybernetics, or Control and communication in the animal and the machine. *MIT press* 25.
- Wikipedia. (2014). Ontologie (Informatique). Consulté 16 février 2015, à l'adresse http://fr.wikipedia.org/wiki/Ontologie_%28informatique%29
- Wikipedia. (2015a). Psychologie expérimentale. Consulté 16 juillet 2015, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Psychologie_exp%C3%A9rimentale
- Wikipedia. (2015b). Scientific visualization. Consulté 22 avril 2015, à l'adresse http://en.wikipedia.org/wiki/Scientific_visualization
- Wikipedia. (2016a). Change blindness. Consulté 6 septembre 2016, à l'adresse http://en.wikipedia.org/wiki/Change_blindness
- Wikipedia. (2016b). Cindynique. Consulté 15 septembre 2016, à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cindynique>

- Wikipedia. (2016c). Mémoire à long terme. Consulté 30 novembre 2016, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Mémoire_à_long_terme
- Wikipedia. (2016d). Récit. Consulté 3 novembre 2016, à l'adresse <https://fr.wikipedia.org/wiki/Récit>
- Wikipedia. (2016e). Représentation graphique de données statistiques. Consulté 9 janvier 2017, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Représentation_graphique_de_données_statistiques
- Wikipedia. (2016f). Système complexe. Consulté 25 août 2016, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_complexe#Notes_et_r.C3.A9f.C3.A9rences
- Wikipedia. (2016g). Web 2.0. Consulté 24 août 2016, à l'adresse https://fr.wikipedia.org/wiki/Web_2.0
- Wilkening, J. et S. I. Fabrikant. (2011). How do decision time and realism affect map-based decision making? In M. Egenhofer, N. Giudice, R. Moratz, et M. Worboys (Eds.), *10th International Conference COSIT 2011*, Vol. LNCS 6899, p. 1-19. Springer Berlin Heidelberg.
- Wood, M. (1993). The map-users' response to map design. *The Cartographic Journal* 30, 149-153.
- Wu, W., D. Kelly, A. Edwards, et J. Arguello. (2012). Grannies , tanning beds , tattoos and NASCAR : Evaluation of search tasks with varying levels of cognitive complexity. In *Proceedings of the 4th Information Interaction in Context Symposium (IIIX'12)*, p. 254-257. Nijmegen (The Netherlands): ACM.
- Yharrassarry, R. (2009). Théorie de la Gestalt. *iErgo : le bloc-notes ergonomie et UX*.
- Zacks, J. M. et B. Tversky. (2001). Event structure in perception and conception. *Psychological bulletin* 127, 3-21.
- Zanin, C., N. Lambert, C. Grasland, P.-A. Davoine, H. Mathian, et C. Saint-Marc. (2013). Recent Computer Technologies for an Innovative Cartographic Language. In *Espon Cartographic Language - Interim Report*, p. 77-130.
- Zeki, S. (1992). The Visual Image in Mind and Brain. *Scientific American* 267, 69-76.
- Zhang, L., M. H. Tong, T. K. Marks, H. Shan, et G. W. Cottrell. (2008). SUN: A Bayesian framework for saliency using natural statistics. *Journal of Vision* 8, 32.

Liste des publications

Revue

- Cécile Saint-Marc**, Marlène Villanova-Oliver, Paule-Annick Davoine, Cicely Pams-Capoccioni, Dorine Chenier (2017). User Testing of Dynamic Geovisualizations: Lessons Learned and Possible Improvements for Cartographic Experiments. *International Journal of Cartography*, (in press). doi:10.1080/23729333.2017.1301347
- Cécile Saint-Marc**, Paule-Annick Davoine, Marlène Villanova-Oliver (2014). Methods for mapping volcanic events overlaid across time. *The Journal of Maps, Special Issue: Mapping Environmental Risks - Quantitative and Spatial modeling approaches*, Taylor and Francis: London (England). doi:10.1080/17445647.2014.888376
- Laurent Michon, Andrea Di Muro, Nicolas Villeneuve, **Cécile Saint-Marc**, Pierluigi Fadda, Fabbio Manta (2013). Eruptive activity of the summit cone of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion island): a historical and geological review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 08/2013, 264:117-133. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.06.012

Conférences internationales

- Cécile Saint-Marc**, Marlène Villanova-Oliver, Paule-Annick Davoine, Cicely Pams Capoccioni, Dorine Chenier (2016). Representation and Visualization of Imperfect Geohistorical Data about Natural Risks: A Qualitative Classification and its Experimental Assessment. 19th Agile Conference on Geographic Information Science, 14-17 June 2016, Helsinki (Finland).
- Cécile Saint-Marc**, Cicely Pams Capoccioni, Gilles Saussine, Dorine Chenier, Paule-Annick Davoine, Marlène Villanova-Oliver (2016). IDISFER, an Ontology to Model Extreme Floods-Related Processes. 11th World Congress on Railway Research, 30 May - 2 June 2016, Milan (Italy).
- Paule-Annick Davoine, Héléne Mathian, Cécile Saint-Marc, Jean-Yves Blaise, Lahouari Kaddouri (2015). The Visual Representations of Territorial Dynamics: Retrospective and Input from New Computing Environments. 27th International Cartographic Conference (ICC 2015), 23-28 août 2015, Rio de Janeiro (Brésil).
- Cécile Saint-Marc**, Paule-Annick Davoine, Marlène Villanova-Oliver (2014). Dealing with the Imperfection of Historical Hazards Data in GIS: Limits and Solutions to Make Chronological Maps for Decision Makers. Actes du Workshop 'Visually-Supported Reasoning with Uncertainty', GIScience 2014, 23-26 novembre 2014, Vienne (Autriche).
- Paule-Annick Davoine, **Cécile Saint-Marc**, Andrea DiMuro, Thomas Staudacher, Valérie Ferrazini, Patrice Boissier, Patrick Bachelery, Nicolas Villeneuve, Laurent Michon (2013). Mapping multi-level temporal data set to investigate the spatio-temporal evolution of volcanic activity of Piton de la Fournaise volcano. Oral presentation, 18th European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography (ECTQG 2013), 5-9 September 2013, Dourdan (France).

Conférences nationales

- Héléne Mathian, Jean-Yves Blaise, Paule-Annick Davoine, Lahouari Kaddouri, Cécile Saint-Marc (2015). Géovisualisation des temporalités des territoires : analyse comparative de la diversité des productions. 12ièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon (France), 20-22 Mai 2015, pp. 232-234.
- Cécile Saint-Marc**, Dorine Chenier, Denis Coeur, Cicely Pams Capoccioni, Paule-Annick Davoine, Marlène Villanova-Oliver (2014). Apprendre du passé pour optimiser la prévention et la gestion des

inondations sur le ferroviaire. Actes du Symposium International Géorail 2014, 6-7 novembre 2014, Marne-La-Vallée (France).

Paule-Annick Davoine, **Cécile Saint-Marc**, Andrea Di Muro, Thomas Staudacher, Marlène Villanova-Oliver, Patrice Boissier (2012) : Constructions cartographiques pour la caractérisation de l'aléa volcanologique du Piton de la Fournaise : Cartographie de séries de données chrono-spatiales. Actes de la conférence SAGEO 2012, 7-9 novembre 2012, Liège (Belgique), 2012, 16 p.

Chapitres d'ouvrage

Paule-Annick Davoine, et **Cécile Saint-Marc** (2015). A Geographical Information System for mapping eruption risk at Piton de la Fournaise, Reunion Island. In: Bachèlery, P., Lénat, J.-F., Di Muro, A., Michon, L. (eds.), Active Volcanoes of the Southwest Indian Ocean: Piton de la Fournaise and Karthala. Active Volcanoes of the World. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg, 250 p. ISBN: 978-3-642-31394-3

Cécile Saint-Marc et Paule-Annick Davoine (2014). Cartes de localisation des inondations remarquables. In : Michel Lang, Denis Cœur (eds.), Les inondations remarquables en France : Inventaire 2011 pour la directive Inondation. Edition Quae, p.513-577. ISBN: 978-2-7592-2260-5

Rapports

Lahouari Kaddouri, Jean-Yves Blaise, Paule-Annick Davoine, Hélène Mathian, **Cécile Saint-Marc** (2014). État des lieux des représentations dynamiques des temporalités des territoires. Rapport commandité par le PUCA, Ministère de l'Ecologie, 167 p. Disponible en ligne : <http://www.map.archi.fr/jyb/puca/>

Christine Zanin, Nicolas Lambert, Claude Grasland, Paule-Annick Davoine, Hélène Mathian, **Cécile Saint-Marc** (2013). Recent Computer Technologies for an Innovative Cartographic Language. In : Espon Cartographic Language: 1st Report, pp. 77-130. Disponible en ligne : <http://www.umsriate.fr/Webriate/?portfolio=espon-cartographic-language-ecl>

Posters et Magazines

Cécile Saint-Marc, Cicely Pams Capoccioni, Anne Redon, Dorine Chenier (2016). L'étude des inondations historiques majeures et leurs impacts : un enjeu pour l'avenir du système ferroviaire. Revue Générale des Chemins de Fer, n°263, septembre 2016.

Marlène Villanova-Oliver, Anthony Hombiat, **Cécile Saint-Marc**, Paule-Annick Davoine, Jérôme Gensel (2013). Capitalisation de l'information géohistorique dans le cadre de la Directive Inondation : Principes et développements de la BDHI (Base de Données Historiques sur les Inondations). Poster de la conférence SAGEO 2013, 24-26 septembre 2013, Brest, France.

Paule-Annick Davoine, Andrea Di Muro, Thomas Staudacher, Patrice Boissier, **Cécile Saint-Marc**, Nicolas Villeneuve, Laurent Michon (2012). Improving Volcanological Data Management by Innovative Geomatics Approaches: Application to the Piton de la Fournaise Volcano Data. Poster in AGU Chapman Conference on Hawaiian Volcanoes: From Source to Surface, 20-24 August 2012, Waikoloa (Hawai'i, USA).

Résumé :

Cette thèse a été conduite dans le cadre d'une convention industrielle avec SNCF Réseau. Elle se situe dans le domaine de la géovisualisation et porte sur l'élaboration de méthodes de visualisation cartographiques adaptées à l'analyse des impacts des inondations sur le système ferroviaire.

Les événements historiques sont une source d'informations importante pour la compréhension et la gestion des risques naturels. La cartographie s'est imposée comme un outil clé pour appréhender les risques dans leurs contextes territoriaux. Mais l'élaboration de visualisations qui restituent la complexité des processus survenus pendant la catastrophe naturelle n'est pas aisée sans altérer la lisibilité de la représentation. Trois facteurs complexifient notamment la représentation cartographique de ces processus : la nécessité de représenter à la fois les dimensions spatiales et temporelles des événements issus de risques, le besoin de visualiser les effets dominos qui sont un facteur d'amplification des dommages, et la volonté d'adapter les représentations aux besoins et aux capacités cognitives des utilisateurs. Peu de travaux ont étudié la géovisualisation de processus complexes et encore moins ont été évalués auprès d'utilisateurs. Notre travail vise donc à pallier ces manques.

Ce travail a conduit à quatre contributions. La première est la formalisation des récits d'inondations dans une ontologie de domaine, qui décrit à la fois les événements issus d'inondations, les effets dominos et leurs impacts sur le système ferroviaire et les mesures de réaction pour ramener le système à l'état d'équilibre. A partir de l'instanciation de cinq inondations historiques variées, notre deuxième contribution consiste en des principes sémiologiques généralisables pour cartographier les récits d'inondations. La troisième contribution est l'intégration de ces propositions dans une interface de géovisualisation, intégrant des visualisations innovantes pour mieux appréhender les temporalités associées aux événements. Cette interface de géovisualisation a fait l'objet d'une expérimentation auprès des experts du domaine ferroviaire. Les résultats ont validé les propositions relatives à la représentation du temps mais ont infirmé les propositions de visualisation des effets dominos. Grâce à l'analyse des résultats et des limites de notre protocole, la quatrième contribution consiste en un modèle de protocole expérimental réutilisable, adapté au test d'interfaces de géovisualisation.

Mots-clés : géovisualisation, risques naturels, inondations, système ferroviaire, données spatio-temporelles

Abstract:

This research was led in an industrial partnership with SNCF Réseau. Conducted in the field of geovisualization, it focuses on developing cartographical visualization methods adapted to the analysis of the impacts of floods on the railway system.

Historical events are of great help to understand and manage natural risks. Cartography became a key tool to analyze risks in their territorial contexts. But making maps which remain legible, while showing all the complexity of risk processes that occurred during natural disaster, is not easy. The main challenges are the need to represent both the temporal and the spatial dimensions of risk events, the need to visualize domino-effect, because they often lead to worsen damages, and the will to adapt representations to the cognitive capacities of users. Only a few studies worked on geovisualization proposals to represent complex process and even fewer evaluate these proposals with users. Our work aimed to palliate these lacks.

This research resulted in four contributions. The first one is the formalization of flood narratives in a domain ontology, which describes flood events, domino-effects, their impacts on the railway system, and response measures to restore the system. Five case studies of historical floods were instantiated in the model. Resulting from their study, the second contribution consists in generic semiology principles to visualize the narratives of floods on a map. The third contribution is a geovisualization interface, which includes original graphical representations to visualize the temporal features associated with flood events. This geovisualization interface was tested in an experiment with expert users of the railway field. Results confirmed the proposals of representation of time but disconfirm proposals of visualization of domino effects. The analysis of the experimental procedure led to a fourth contribution, which consists in a reusable model of experiment, which is adapted to test geovisualization interfaces.

Keywords: geovisualization, natural risks, floods, railway system, spatio-temporal data