HAL
open science

Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude

Aurélie Arnaud, Paule-Annick Davoine

To cite this version:

Aurélie Arnaud, Paule-Annick Davoine. Approche cartographique et géovisualisation pour la représentation de l'incertitude. SAGEO, Nov 2009, Paris, France. pp.12. halshs-00667166

HAL Id: halshs-00667166

https://shs.hal.science/halshs-00667166

Submitted on 7 Feb 2012

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.

Approche cartographique et géo visualisation pour la représentation de l'incertitude.

Application à l'information dédiée aux risques naturels

Aurélie Arnaud * - Paule Annick Davoine **

** Laboratoire PACTE-TERRITOIRE*
14bis Avenue Marie Reynoard
38 100 Grenoble
orelyarno@yahoo.fr

*** Laboratoire d'informatique de Grenoble*
681, Rue de la passerelle
38 402 Saint-Martin-d'Hères
Paule-annick.davoine@imag.fr

RÉSUMÉ. *Si la carte est un outil essentiel pour la gestion des risques naturels et la prise de décision, elle est souvent critiquée car elle ne rend pas compte de l'incertitude des données représentées. L'incertitude constitue une dimension particulière de l'information géographique notamment dans une problématique de risques naturels. Notre objectif est de proposer une méthode permettant de rendre compte cartographiquement de l'information incertaine relative aux événements liés aux risques naturels. Dans un premier temps nous définissons la notion d'incertitude appliquée à l'information sur les risques naturels, puis nous proposons des variables visuelles et géovisuelles capables de rendre compte à travers des environnements cartographiques de la dimension incertaine de l'information.*

ABSTRACT. *This article presents cartographical and geovisualization methods to integrate the concept of uncertainty in the maps. We focus on the uncertain information about natural hazards, and particularly the rockfalls. In a first time, we define the concept of uncertainty for geographical information about natural hazard. A related works of mapping rules be able to valorise this information is also used. Then we propose some visual variables to map the uncertainty and we explain how these visual variables can be integrate into a tool geovisualization.*

MOTS-CLÉS: *cartographie, incertitude, information géographique, modélisation et representation cartographique, risques naturels, variable visuelle, géovisualisation*

KEYWORDS: *cartographical varaible, geographical information, geovisualization, natural hazard, uncertainty, risk events*

1. Introduction

Le choix de l'étude de l'incertitude dans l'information relative aux événements issus de risque découle d'une demande importante de la part d'acteurs du territoire. En effet, cette information possède de nombreux enjeux. D'une part elle est très utile aux scientifiques qui la réutilisent pour valider, par exemple, leurs modèles de simulation dans le cadre de prévision des risques. D'autre part, elle est indispensable aux décideurs qui s'appuient sur elle pour orienter leurs choix en termes de prévention des risques, d'aménagement mais aussi de développement de leur territoire. Les techniciens, quant à eux, l'utilisent, entre autre, pour dimensionner des ouvrages de protection [ARN 09].

Mais cette information n'est pas réutilisable en l'état : certaines de ses spécificités doivent être mises en valeur. Parmi elles, l'incertitude pose problème du fait de ses définitions controversées et de sa retranscription souvent incomplète et peu adaptée aux besoins des utilisateurs. C'est pourquoi cet article se focalise sur sa cartographie, avec pour objectif de trouver des moyens de l'afficher de manière exhaustive.

Dans un premier temps, l'article s'attachera à définir la spécificité de l'incertitude de l'information dédiée aux événements issus de risques. Dans un second temps, un état de l'art de la cartographie de l'incertitude sera présenté. Une réflexion sera alors menée sur sa géovisualisation, c'est-à-dire sa cartographie dans un environnement interactif, animé et multimédia. Pour finir, une application aux éboulements rocheux sera présentée.

2. D'une information incertaine à l'information sur l'incertitude : l'exemple de l'information dédiée aux événements

L'étude des risques naturels repose, entre autre, sur la connaissance des évènements passés. Ces derniers sont décrits par un ensemble d'informations ou de données issues de sources hétérogènes plus ou moins précises, comprenant une part importante d'expertise. Lorsque la connaissance des évènements passés a pour objectif une reconstitution historique et que les données sont issues d'enquêtes en archive, on parle d'information historique dédiée aux risques naturels ou d'information sur les événements historiques [DAV 04]. Cependant, le risque est perçu à travers l'histoire réelle des évènements et non pas à travers leur probabilité ; la notion d'aléa n'est donc pas prise en compte. C'est pourquoi, nous proposons de parler d'information dédiée aux évènements issus de risques, que nous nommerons IDE. Toutefois, cette information est souvent considérée comme une information

incertaine de part ses modes de collecte, d'acquisition, de traitement, d'analyse [ARN 09]. Il est donc important de lui attacher une information spécifique caractérisant cette incertitude.

L'objectif de cette section, est de présenter la notion d'information sur l'incertitude en prenant appui sur l'exemple de l'IDE. Nous spécifions dans un premier temps la notion d'IDE, puis nous nous attardons sur les différentes approches disciplinaires de la notion d'incertitude, avant de proposer une typologie de l'information sur l'incertitude adaptée à l'IDE.

2.1. *L'Information Dédiée aux Evénements issus de risques (IDE) : une information incertaine*

L'information relative aux événements issus de risque est composée de données brutes, directement issues de sources telles que des capteurs ayant enregistré des secousses sismiques, des mouvements de terrains ou encore la montée d'un cours d'eau, des études de terrains où un observateur relate la cicatrice de l'événement sur un espace physique. Cette information est également constituée d'informations issues du traitement d'un ensemble de données ou d'informations. Ces traitements peuvent nécessiter, de la part des acteurs, une bonne connaissance du contexte de risque et des événements passés, telle que la reconstitution de l'histoire des événements, récents ou anciens.

Cependant, l'information sur l'incertitude est déconsidérée par les sciences car elle est associée à la faute ou à l'incapacité à quantifier ou qualifier de manière précise. Ceci explique le fait qu'elle soit parfois dissimulée. De plus, cette incertitude n'est pas comprise par les profanes qui ont du mal à l'accepter [DEC 97]. De plus, les acteurs du risque ont un réel besoin de ce type d'information [ARN 09]. Il nous semble alors indispensable de la porter à la connaissance des utilisateurs d'une part en la définissant, d'autre part, en la valorisant à travers l'outil cartographique. Mais la connaissance de cette spécificité et son affichage sur les cartes sont délicats à transmettre : « *la complexité du phénomène est telle que l'analyse réalisée par l'expert est entachée d'incertitudes. Ces incertitudes se manifestent au stade du passage de la cartographie technique, élaborée par le scientifique au zonage réglementaire à l'intention du décideur. Cette transcription révèle en outre des difficultés structurelles, notamment des logiques et un langage différents* » [BLA 01].

Afin d'améliorer la connaissance et la compréhension de l'incertitude, nous allons tout d'abord tenter de définir la composition de l'information relative. L'information incertaine est liée à l'information d'un objet (l'information elle-même), mais aussi aux contenants de l'information (les sources des documents supports de l'information). L'information sur l'incertitude est ici considérée comme

une méta-information puisqu'elle informe sur un aspect particulier de l'information ou ses sources. Néanmoins, les définitions sont très variées, c'est pourquoi la partie suivante tente de construire une base sémantique consensuelle.

2.2. *Autour de la notion d'incertitude*

Dans les sciences humaines et sociales, et particulièrement en géographie, l'incertitude est « liée à la subjectivité » : les données peuvent être interprétées selon des facteurs externes à l'objet, mais propres à l'observateur [ROL 00]. L'incertitude comporte deux composantes complémentaires : l'incertitude sémantique et l'incertitude géométrique. L'incertitude sémantique dépend de la compréhension et de l'interprétation des mots lors de la description d'un phénomène géographique. Elle est liée à la subjectivité de la connaissance, et à « *l'utilisation d'attributs vagues ou mal définis* » (ex. loin, près, proche, plus ou moins, beaucoup). Il s'agit d'imprécision. Quant à l'incertitude géométrique, elle est liée au report des objets sur une carte qui dépend de l'échelle et des référentiels utilisés. Dans ce cas, l'incertitude est liée à l'objet lui-même dont la délimitation est imprécise et imparfaite. La limite floue désigne ces caractéristiques qualitatives ou quantitatives (dont la localisation géographique) d'un objet, mais celles-ci sont peu ou mal connues (ex. l'extension d'une espèce ou l'aire d'influence d'un phénomène physique). La certitude absolue est donc peu envisageable et de ce fait, l'homme a besoin de la nuancer. La notion d'incertitude est alors étudiée dans le domaine des mathématiques avec la théorie des sous-ensembles flous qui tente de sortir de la dichotomie appartient/n'appartient pas ou vide/plein. Rolland-May [ROL 00] se l'approprie pour l'adapter au domaine de la géographie en créant la notion d'« objet géographique flou » dont les limites sont imprécises. Il est composé d'un cœur et d'une frange.

Toujours dans le domaine des sciences sociales, le cas de l'étude des témoignages révèle l'incertitude liée aux erreurs qui se glissent dans la lignée de l'information : lors de l'acquisition de données, lors de son stockage et lors de la restitution de l'information à un tiers. La dimension subjective telle que l'oubli, l'omission, la détérioration, la sur- ou sous-estimation transforment, pendant ou entre ces trois étapes, l'information finale. C'est-à-dire que la subjectivité agrandit la distance entre le fait réel et le fait perçu [BOD 02]. Dans le cas de témoignages, les incertitudes sont sémantiques. En effet, ils sont interprétés par des « filtres cognitifs », qui dépendent en partie de la connaissance d'une personne, mais aussi de son caractère. Ces filtres sont différents selon la fiabilité du témoin (ex. témoin possédant des enjeux dans l'immobilier).

L'étude du point de vue des sciences humaines et sociales sur l'incertitude nous révèle donc quatre facteurs d'incertitude : l'imprécision spatiale et sémantique, la

subjectivité des auteurs, la fiabilité des sources et les erreurs qui se glissent dans la généalogie de l'information.

Selon Buttenfield in [MAC 05] l'incertitude contient l'information sur la qualité des données, la fiabilité des sources, et l'exactitude/erreur dans les données. D'après cet auteur, l'incertitude provient également de l'imprécision qui renseigne sur la précision de la position (à « plus ou moins » l'unité utilisée), la précision de l'attribut, la cohérence logique (relations encodées dans la structure des données), l'exhaustivité (relations entre les objets et description de leur « univers »), et la lignée (d'où vient la donnée et ses transformations). Thomson [THO 05] note aussi que l'imprécision résulte du degré de granularité de l'information (degré de précision). L'hypothèse clef développée par cet auteur est que la représentation de l'incertitude à travers une approche quantitative est plus utile qu'une approche qualitative car elle fournit une information contenant une combinaison de types d'incertitudes. Plusieurs modèles existent alors, valorisant certaines informations plus que d'autres. Toutefois, ces modèles montrent leurs limites car les calculs sont compliqués (ex. algorithmes) et le lecteur ne peut disposer d'une vision objective de l'incertitude. De plus, la typologie de Thomson [THO 05] rencontre des limites : elle ne met pas en évidence ce qui appartient à l'incertitude et ce qui dépend plus spécifiquement de l'imprécision. Cependant, l'auteur introduit un autre facteur d'incertitude qui s'exprime à travers les sources isolées et non reliées aux autres .

Norton [NOR 03] estime, que l'incertitude n'est pas un élément quantifiable mais qu'elle renvoie à différents aspects qui aident à prendre des décisions.

2.3. *Vers une typologie de l'information sur l'incertitude*

L'analyse de l'ensemble de ces définitions confrontée au contexte de l'IDE mène à considérer trois types de facteurs d'incertitude : les facteurs liés à l'information (rassemblant l'imprécision sémantique – spatiale – attributaire – liée à la granularité, l'objectivité de l'information, la validité, l'incomplétude et l'exhaustivité), les facteurs humains (composés de la subjectivité des auteurs et de la cohérence logique : accord/désaccord), ainsi que les facteurs liés aux supports de l'information (comprenant la traçabilité de l'information, la fiabilité/crédibilité des sources et les interrelations entre les sources). La présence et l'utilisation courante des paramètres qualitatifs (les facteurs humains) renforcent le postulat sur la difficile quantification de l'incertitude.

Les critères les plus représentatifs de l'incertitude et les plus utilisés par les acteurs sont les erreurs techniques qui se glissent dans la généalogie de l'information et la fiabilité des sources. L'imprécision est également un facteur très utilisé par les acteurs.

Parmi l'ensemble des facteurs d'incertitude, ceux qui caractérisent particulièrement l'IDE sont [ARN 09]: l'incomplétude de l'information, la subjectivité des auteurs, la cohérence logique entre les informations, l'objectivité de l'information. Des critères de qualité s'ajoutent : l'imprécision de l'information, la fiabilité des sources et les erreurs dans la généalogie de l'information (lors de transformations). Leur relation montre que ces facteurs s'influencent les uns les autres (Figure 1).

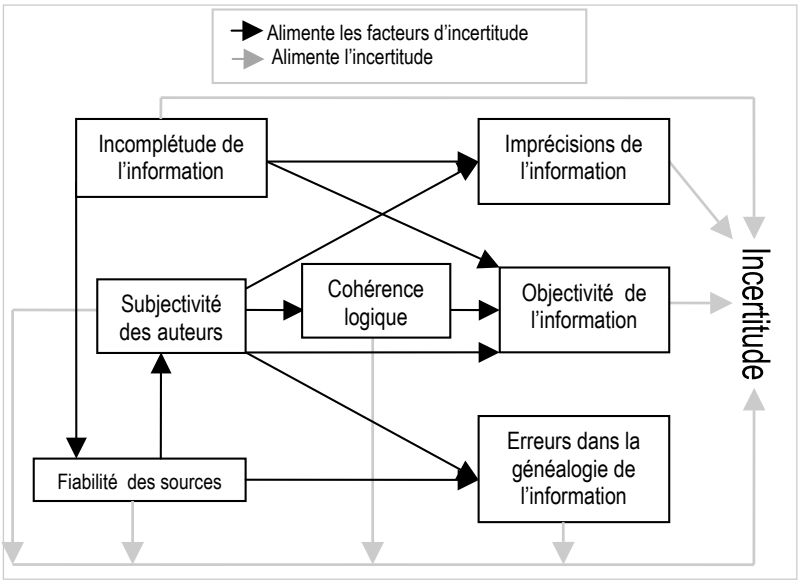

Figure 1. *Interrelations entre les facteurs d'incertitude de l'IDE*

2.4. La notion d'incertitude appliquée à l'information dédiée aux éboulements rocheux

L'information sur les éboulements rocheux se traduit par une description fine des propriétés d'un éboulements : des volumes, la géologie, des coordonnées géographiques, etc. Cependant, il s'agit d'une information récoltée sur le terrain via des carnets de notes qui sont ensuite retranscrites dans divers formats : du texte, des tableurs et des dessins (croquis). Les photographies sont également un élément important de la récolte de ce type d'information. Les sources des données et des informations sont anciennes (ex. vieilles photographies et récits) à récentes (ex. recherches actuelles sur les traces physiques laissées par les éboulements). Ces caractéristiques de l'information apportent alors un certain nombre d'incertitudes :

- La diversité des sources implique une incertitude de type « fiabilité des sources »

- la vétusté de certains récits peut engendre une « subjectivité des auteurs »

- La retranscription de l'information induit quand à elle une incertitude de type « généalogie de l'information »

- La vétusté des traces physiques apporte une « imprécision » métrique, voire même de localisation

Cette dimension incertaine de l'IDE nécessite d'être valorisée afin que les acteurs des territoires se l'approprient davantage. Or, sur Internet, support d'information démocratisé, même s'ils existent, peu de sites divulguent de l'information sur l'incertitude [ARN 09]. Celle-ci est mentionnée sous forme textuelle. Néanmoins, d'autres présentations visuelles, telles que la cartographie, apporteraient un grand intérêt pour optimiser sa compréhension. Toutefois, cette technique est encore peu répandue.

Le choix de la représentation cartographique pour lire l'incertitude se justifie par les éléments suivants : Elle présente un grand intérêt pour alimenter la connaissance afin d'aider à la localisation et à l'interprétations, mais aussi pour aider les acteurs à prendre des décisions. En effet, la carte permet, par la représentation de données et d'informations géolocalisées de comprendre et d'analyser des phénomènes de répartitions, d'extensions, d'enjeux, d'interactions homme–espace, etc. : les acteurs des territoires cartographiés se posent les questions « où » et « pourquoi là ? » [THO 01]. De plus, la carte est l'outil idéal de la prévention des risques, grâce à ses multiples fonctions, et notamment celles d'évaluation, d'information, de responsabilisation et de négociation [COM 04]. Mais ce n'est pas sans poser des problèmes et notamment dans la représentation des incertitudes [TEK 06].

3. Cartographie de l'incertitude : Etat de l'art

La cartographie est un ensemble de règles sémiologiques visant à représenter des attributs d'objets localisés. Des variables visuelles statiques ont été créées par Bertin [BER 67], précurseur d'un langage normalisé des cartes. D'autres auteurs ont repris ces travaux, notamment pour représenter le temps [PET 94], [ORM 95], [LHO 03], mais aussi l'incertitude. Nous nous focalisons sur la représentation cartographique de cette dernière dimension où des règles de cartographie et de cognition peuvent être mobilisées.

3.1. *Règles cartographiques pour représenter l'information incertaine*

Les écrits montrent une recherche active dans ce domaine dès les années 1990. Les variables cartographiques pour représenter l'incertitude sont dispersées dans la littérature et s'appliquent à certains types d'incertitudes. Cette sous-partie tente d'en mener une analyse.

Buttenfield in [THO 05] propose quelques solutions pour représenter l'incertitude en réalisant un tableau de variables visuelles correspondant à cinq types de « qualités de données » : l'imprécision spatiale et attributaire (mesures), la cohérence logique (accord/désaccord), l'incomplétude et la lignée. Puis l'auteur détermine des variables visuelles pour chaque propriété d'attributs (quantitatif discret, qualitatif et quantitatif continu), sachant qu'un type d'incertitude peut contenir plusieurs propriétés : l'incertitude de position se représente à travers la variable de la taille lorsque sa nature est discrète (ex. : des degrés d'imprécision), mais aussi à travers la variable valeur si elle est ordonnée (ex. : imprécision/moyenne imprécision/grande imprécision). Les variables appliquent alors une sémiologie classique (la taille, la valeur, la couleur, le grain, la forme) en ne suivant que peu les règles définies par Bertin [BER 67] : par exemple la propriété quantitative est représentée au moyen de la forme, de la valeur et de la couleur. Par ailleurs la pertinence de ces propositions est peu évaluée.

MacEachren [MAC 95] étend les variables visuelles de Bertin en ajoutant le « foyer » (variable du point) dont les contours sont estompés pour représenter des objets à localisation incertaine. Cette variable s'applique indépendamment des autres : par exemple, la taille et la couleur du point peuvent varier en plus de la variable « foyer ».

Dragicevic [DRA 00] propose une représentation de « zones non renseignées » sous la forme de traits plus ou moins épais. L'imprécision métrique est considérée comme un attribut quantitatif discret auquel l'auteur associe une variable visuelle conforme aux règles classiques (la taille).

Plus récemment, Pang in [GRI 06] définit les variables visuelles de la couleur, la taille, la position, l'angle (la direction), la texture, la clarté/le flou de zones, la transparence et la netteté de points comme pouvant représenter l'incertitude. La valeur ou la valeur associée à la couleur qui se dégrade, l'épaisseur du trait, ou encore l'isoligne présente également un moyen de cartographie de l'incertitude [CHE 06].

Le choix de ces variables va dépendre de la nature de l'information sur l'incertitude à représenter (incertitude sur la taille d'un objet ; incertitude d'une localisation). En outre, afin d'éviter la confusion avec la sémiologie graphique

classique, il convient de réserver les variables de l'isoligne pour représenter un relief.

Afin de représenter l'incertitude, l'utilisation de ces variables doit s'adapter aux objets affichés, tant au niveau de la nature de l'incertitude (quantitative, qualitative) qu'au niveau du signe élémentaire qui représente l'objet (point, ligne, surface).

Cependant, de nombreux auteurs proposent des calculs d'incertitude pour la représenter sur la carte, condamnant une grande quantité d'information cachée derrière les figurés, dont la composition est pourtant complexe et parfois controversée. Or, les acteurs des territoires ont besoin de toutes ces informations et pas seulement d'un indice d'incertitude.

Toutefois, nous retenons la création de la nouvelle variable visuelle introduite par MacEachren [MAC 95] : le « foyer ». En effet, cette variable s'avère très intéressante car, d'une part, elle exprime convenablement l'aspect incertain, et d'autre part, elle est simple d'utilisation sans nécessairement effectuer de calculs. Toutefois, elle s'applique uniquement au signe élémentaire du point. Néanmoins, au même titre que le foyer, d'autres variables, proposées par Pang in [GRI 06], paraissent intéressantes à exploiter : la netteté (qui s'applique aux signes ponctuels et linéaires), la transparence et la clarté/le flou (qui s'appliquent aux surfaces). D'ailleurs, les Cartes de Localisation Probable des Avalanches (CLPA) du CEMAGREF de Grenoble commencent à utiliser la variable de la transparence afin de représenter des zones d'avalanches incertaines [BOD 02].

3.2. *Règles de cognition*

D'autres règles de sémiologie apparaissent dans le domaine de la cognition avec Weger [WEG 96] qui travaille sur l'utilisation des symboles dans le cadre de la réalisation de cartes IGN :

- la ligne droite représente l'immobilité et, à l'inverse, l'instabilité se traduit par des formes aiguës en équilibre sur une pointe : ▼ ◆ ;

- la ligne discontinue peut signifier l'interruption provisoire du phénomène, posséder un caractère plus aléatoire que son homologue continu (route irrégulièrement entretenue).

Parfois, le foyer, la netteté, la transparence et la ligne pointillée sont choisis pour représenter des imprécisions liées à la localisation d'objets, de lignes ou de surfaces. Quant aux zones floues, elles cartographieront les espaces où l'information est incomplète ou inconnue (Tableau 1).

Facteurs d'incertitude	Variables visuelles d'incertitude
Imprécision	Foyer (point) Pointillé, limite pas nette (Ligne) Transparence (surface)
Traçabilité	
Fiabilité des sources	
Incomplétude de l'information	Zones floues
Objectivité de l'information	
Cohérence logique	
Subjectivité des auteurs	

Tableau 1. *Application des règles aux facteurs d'incertitude*

Cependant, l'ensemble de ces règles ne peut pas rendre compte de l'ensemble des facteurs d'incertitude. Les facteurs qualitatifs qui nécessitent des informations textuelles pour leur compréhension sont alors les « laissés pour compte » de la carte. La cartographie intégrant un processus de géovisualisation est-elle capable de mieux valoriser la compréhension de l'information incertaine ? La géovisualisation semble présenter un certain nombre d'issues que nous allons maintenant exploiter.

4. Apport de la géovisualisation dans la cartographie de l'incertitude

La géovisualisation se base sur un environnement animé, interactif et multimédia, appliqué à la cartographie et aux données géo-référencées, afin de découvrir de nouvelles relations, méthodes, hypothèses, cohérences imparfaites, etc. [MAC 01], [SLO 01], [KRA 07]. La géovisualisation met en évidence plusieurs formes cartographiques. Il s'agit des cartes animées, interactives, dynamiques et multimédia.

4.1. *La carte animée*

Une carte animée est créée par l'animation d'une succession de cartes. Ce processus représente un changement sur place (la position), en place (les attributs) ou dans le temps [KRA 01]. L'animation peut également être créée par l'animation d'agents ou la déformation de la carte en certains points. La carte animée a plusieurs qualités : elle permet de révéler des phénomènes spatio-temporels ainsi que des changements ; elle réduit également la surcharge graphique.

D'après Caquard, [CAQ 03], les variables visuelles les mieux adaptées à l'animation sont la taille et la valeur. La variation de la transparence peut également induire le mouvement. Quant à Cheylan [CHE 07], il anime la localisation, la taille et la forme.

Cependant, l'utilisation de l'animation pour visualiser l'information incertaine est peu répandue sur le Web.

4.2. *La carte interactive*

La carte interactive est également nommée « carte cliquable ». Elle utilise un environnement interactif qui permet à l'utilisateur d'interagir avec la carte [AND 99], [GRA 05]. Plusieurs techniques sont utilisées : la surbrillance d'un objet au passage de la souris, un clic sur la carte ouvrant une info-bulle ou une fenêtre, ou encore un clic sur des outils associés à la carte permettant de modifier celle-ci (cases à cocher dans une légende, déplacement de curseurs, clics sur graphiques ou sur boutons avant/après, etc.). La sélection textuelle ou d'onglets est également un outil de navigation sur les cartes interactives. Ces techniques ouvrent alors de multiples possibilités de compréhension et de recherche d'information, mais aussi d'exploration et de visualisation de l'information.

Toutefois, si l'interactivité des sites Internet permet aux utilisateur d'accéder à de l'information sur les incertitudes, elles demeure peu reliée aux cartes. Par exemple, le site Internet Sisfrance (http://www.sisfrance.net/) divulgue de l'information sur certaines incertitudes, mais celle-ci n'est pas consultable à partir des cartes, alors que ces dernières constituent le cœur de la structure de consultation de l'information du site.

4.3. La carte dynamique

La carte dynamique naît de l'association d'un environnement interactif et animé. Il s'agit d'une carte animée avec des commandes qui peuvent elles aussi être animées (ex. légende animée). Celles-ci permettent d'interagir et donc de contrôler l'animation. Les temporalités des objets sont mieux appréciées des utilisateurs [KRA 97], [BUZ 99], [PET 99], [CAQ 01]. Néanmoins, cette forme cartographique est peu utilisée pour révéler de l'information sur l'incertitude.

4.4. La carte multimédia

La carte multimédia utilise l'environnement interactif et multimédia. Elle permet à l'utilisateur de consulter de l'information de tout format (des images, des textes, des graphiques, des vidéos, etc.) à partir de la carte [CAR 99], [ANT 04]. Cette information multimédia apparaît dans une info-bulle ou dans une fenêtre qui se positionne à côté de la carte (par exemple, les applications de Google Earth utilisent couramment cette technique). Encore une fois, ce type de carte est peu répandu concernant l'information sur l'incertitude.

La géovisualisation permet d'augmenter le potentiel de représentation cartographique de l'information spatiale et thématique. Ces formes cartographiques apportent également des éléments supplémentaires à la lecture de l'information en permettant de valoriser les aspects thématiques, temporels et multimédia de l'information. Cependant, l'utilisation de ces formes cartographiques reste complexe et son application est rarement adaptée à l'information cartographiée. L'utilisateur se sent alors démuni quant au choix et à la construction de cartes en fonction des objets et des attributs à représenter. Ce problème s'accroît lorsqu'il s'agit de cartographier une information incertaine, à la base peu communiquée.

5. Proposition d'une méthode de géovisualisation : de l'extension des règles cartographiques à la géovisualisation de l'incertitude

Les deux parties précédentes montraient les apports de la cartographie dans la représentation de l'information incertaine, et les apports de la géovisualisation à la carte, révélant ainsi de nouveaux processus et d'autres relations entre les informations cartographiées. Appliquée à notre problématique et notamment aux évènements issus de risques naturels tels que les éboulements rocheux, pour laquelle la notion d'incertitude peut prendre plusieurs aspects, ces règles cartographiques s'avèrent incomplète, et les nouvelles formes de cartes ne sont pas toujours construites de façon pertinentes pour identifier et comprendre et les différentes facette de l'incertitude.

Dans cette partie, nous proposons donc d'étendre les règles de sémiologie pour mieux représenter les facteurs d'incertitude en nous appuyant sur la problématique de l'information dédiée aux éboulements rocheux. L'approche cartographique classique s'avérant insuffisante pour rendre compte des multi facettes de l'incertitude, nous présentons un moyen d'intégrer nos choix cartographiques aux processus de géovisualisation afin de créer des cartes capables de visualiser un maximum d'informations sur l'incertitude. Cet ensemble de propositions constitue le cœur de notre méthode de géovisualisation.

5.1. *Extension des règles cartographiques*

Dans le paragraphe 3.2 nous avons décrit un certain nombre de règles permettant de cartographier des imprécisions et des incomplétudes informationnelles à l'aide des variables cartographiques telle que *le foyer, la netteté, la transparence, la ligne en pointillés et la zone floue*.

La figure 2 présente un exemple de représentation cartographique d'une forme d'incertitude décrit en partie 2, qui est l'imprécision concernant la localisation des zones de dépôt des éboulements qui ont été identifiés dans la région grenobloise et leurs extensions spatiales. Dans cet exemple, les variables cartographiques *transparence* et *ligne pointillée* ont été utilisées pour représenter respectivement les différents niveaux de précisions de l'information recueillies et l'incertitude de l'extension de la zone de dépôt d'un éboulement rocheux.

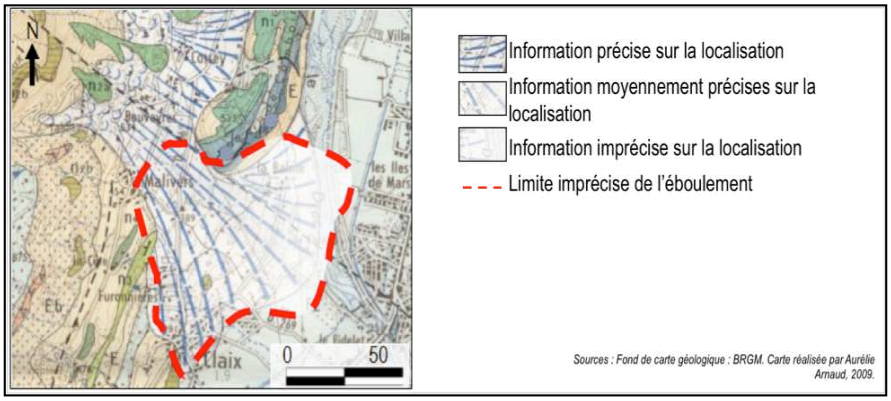

Figure 2. *Cartographie des éboulements rocheux dans la couronne grenobloise : représentation de l'incertitude liée au niveau de précision de l'information géographique recueillie.*

Toutefois, l'ensemble des règles présentées ci-dessus s'avère insuffisante pour rendre compte de l'incertitude puisque les facteurs de la traçabilité, de la fiabilité des sources, de l'objectivité de l'information, de la cohérence logique et de la subjectivité des auteurs ne sont pas représentés. Par ailleurs, il semble important, pour augmenter la facilité de lecture de l'information incertaine, d'ajouter des éléments plus génériques tels que « la présence d'information sur les facteurs d'incertitude », « le doute sur l'existence d'un objet » et « l'incertitude des attributs thématiques ». C'est pourquoi, nous proposons d'étendre la sémiologie graphique pour représenter ces éléments en s'inspirant des règles de cognition :

- une *flèche sinueuse* indique à l'utilisateur de la carte la présence d'informations incertaines au niveau des objets localisés ;

- le *point d'interrogation* ? mentionne le doute sur l'existence d'un objet ;

- une *figurine triste* ☹ montre une incertitude sur l'information alimentant les attributs thématiques d'un objet.

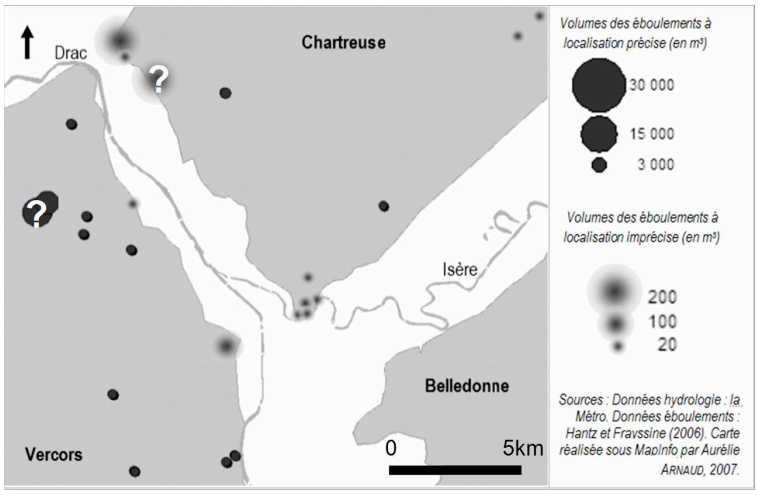

Figure 3. *Cartographie des éboulements rocheux dans la couronne grenobloise : représentation de l'incertitude liée à l'existence d'un objet géographique*

La figure 3 montre un exemple de l'utilisation du foyer pour représenter une localisation incertaine des éboulements situés sur les flancs de massifs montagneux dans la couronne grenobloise. La variable point d'interrogation (?) ajoute une information incertaine en indiquant que des éboulements cartographiés ne se sont peut-être jamais produits.

La figure 4 présente une autre forme de représentation cartographique indiquant une incertitude sur les volumes des éboulements rocheux identifiés (incertitude sémantique). La variable figurine expressive (☹) superposée à la variable visuelle quantité (cercle proportionnel représentant le volume de l'éboulement rocheux), caractérise le niveau de fiabilité de l'information.

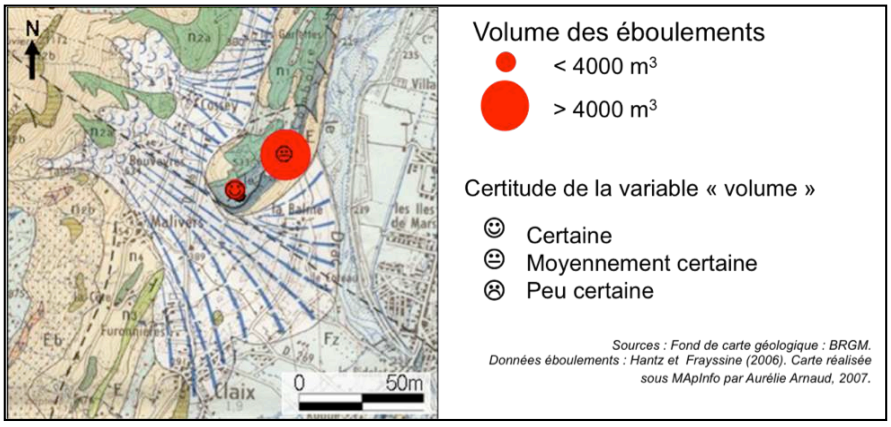

Figure 4. *Cartographie des éboulements rocheux dans la couronne grenobloise : représentation de l'incertitude*

L'exemple de l'information dédiée aux éboulements rocheux, montre bien les multiples facettes de la notion d'incertitude ainsi que la complexité à cartographier cette information qui est essentielle à la fois dans le processus d'identification et de compréhension des phénomènes de risques naturels et dans pour la prise de décision. Toutefois, le problème qui peut en découler est celui de la conception du document cartographique final et de la surcharge cognitive des cartes : la superposition d'une masse d'information concernant un même objet géographique peut rendre rapidement la carte illisible. C'est pourquoi, nous pensons que la représentation cartographique de l'incertitude doit aussi s'inscrire dans une approche de géovisualisation.

5.2. *Géovisualisation de l'incertitude*

Nous pensons que l'association des variables visuelles proposées ci-dessus au potentiel cartographique offert par la géo visualisation peut accroître la prise en compte des différentes dimensions qui caractérisent la notion d'incertitude. Nous présentons ci après nos premières propositions quant à la capacité de chaque nouvelles formes de cartes (animées, multimédia ou interactive) à rendre compte des différentes facettes de l'incertitude.

Appliquée à l'incertitude, la carte animée permet, par exemple, de visualiser l'incertitude dans le temps. L'utilisateur qui observe le déplacement des points d'interrogations ou des figurines peut se rendre compte de leur répartition, qui, elle même peut être fonction d'attributs thématiques évoluant simultanément dans le temps.

La carte dynamique peut assurer le contrôle de cette animation. Celle-ci permet également de distinguer les informations thématiques des informations incertaines grâce au clignotement des points d'interrogation et des figurines, et l'oscillation de la flèche sinueuse.

L'interactivité des cartes permet quant à elle d'accéder, à partir des figurés animés, à des compléments d'information décrivant l'incertitude, à travers notamment les info-bulles.

La carte multimédia permet, en utilisant la technique de l'onglet ou de l'info-bulle, d'intégrer la visualisation de documents correspondant à ces incertitudes : par exemple des rapports d'expertises et de contre-expertise.

L'ensemble de ces règles proposées et récapitulées dans le tableau 2, a pour but d'améliorer la connaissance et la compréhension de l'information sur l'incertitude.

Présentation de l'incertitude / **Incertitude globale**	**Variables cartographiques**	**Interactivité de la carte**
Présence d'information sur les facteurs d'incertitude	∿∿ oscillant	Icône cliquable
Existence de l'objet	**?** clignotant	Icône cliquable
Incertitudes des attributs thématiques	☹ clignotant	Icône cliquable
Facteurs d'incertitude		
Imprécision (dimension floue)	Foyer (point) Pointillé (ligne) Transparence (surface)	Info-bulles
Traçabilité (erreurs techniques dans la lignée, généalogie)		Info-bulles
Fiabilité/crédibilité des sources		Info-bulles
Incomplétude de l'information	Zones floues (surface)	Info-bulles
Objectivité (exactitude) de l'information		Info-bulles
Cohérence logique (accord/désaccord)		Info-bulles
Subjectivité des auteurs		Info-bulles

Tableau 2. *Méthode de géovisualisation de l'incertitude*

Ainsi les principaux facteurs d'incertitude peuvent alors être visualisables de façon simultanée sans forcément surcharger la carte. Par exemple, lorsqu'une flèche oscille sur un éboulement, une info-bulle peut renseigner le ou les facteurs d'incertitude relatifs : par exemple la description d'une traçabilité douteuse.

6. Conclusion et perspectives

L'information sur l'incertitude et l'incertitude de l'information elle-même se glissent dans de très nombreuses données et informations produites, de manière plus où moins prononcée. Il est donc indispensable de permettre l'amélioration de la connaissance et de la compréhension de cette information incertaine pour aider les acteurs des territoires où se produisent des événements issus de risques.

La cartographie et la géovisualisation apportent un certain nombre d'éléments pour valoriser cette dimension de l'information. Leur étude nous a permis de proposer des variables cartographiques et une approche de géo visualisation permettant de rendre compte des facteurs d'incertitude de l'information géographique. Nos propositions ont été appliquées à l'information dédiée aux évènements issus de risques et plus particulièrement aux informations liées aux éboulements rocheux. Nous souhaitons maintenant les implémenter dans un outil de géo visualisation qui puisse prendre en compte de façon simultanée de l'aspect multidimensionnelle de ce type d'information. Les travaux à venir consistent d'une part à intégrer ces propositions dans GenGHIS, plateforme de génération d'interfaces de géo visualisation multidimensionnelle [MOI 07] et [ARN 09] puis de valider leurs pertinences auprès des acteurs du territoire au moyen de protocoles de tests.

7. Bibliographie

[AND 99] Andrienko N., Andrienko G. « Interactive maps for visual data exploration », in Geographical Information Science, vol 13, n°4, pp 355-374, 1999.

[ARN 09] Arnaud A., *Valorisation de l'information dédiée aux événements de territoires à risque. Une application sur la couronne grenobloise*. Thèse de doctorat de Géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 500p. 2009.

[ANT 04] Antoni J-P., Klein O., Moisy S. « Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique ». Revue Cybergéo, article 288, 2004, http://www.cybergeo.eu.

[BER 67] Bertin J., *La sémiologie graphique*. Paris, Gauthiers-Villars, 1967, 431 p.

[BLA 01] Blanchi R., Godfrin V. « De la cartographie réglementaire. Le cas des PRIF, Risques et territoire ». Colloque international. Atelier gestion des risques territorialisés, 16-18 mai 2001, Vaulx en Velin, pp 173-186.

[BOD 02] Bodin X., *La représentation des incertitudes spatiales de la Carte de Localisation Probable des Avalanches*. Mémoire de Maîtrise en géographie, 2002, dir. Morel A, 130 p.

[BUZ 99] Buziek G., « Dynamic éléments », in Multimedia Cartography. Cartwright W., Peterson M-P., Gartner G. springer-Verlag, Berlin, 1999

[CAQ 01] Caquard S., *Des cartes multimédias dans le débat public – Pour une nouvelle conception de la cartographie appliquée à la gestion de l'eau*. Thèse de géographie, Université J. Monnet de Saint-Etienne, 2001, 277 p.

[CAQ 03] Caquard S., « Evolution cartographique et participation publique. Un prototype de cartes multimédia pour la gestion de l'eau ». Revue Internationale de Géomatique, vol 13, n°1, 2003, pp15-27

[CAR 99] Cartwright W., Peterson., Gertner G., *Multimédia cartography*, Springer, 1999, pp 11-30

[CHE 06] Chesneau E. *Modèle d'amélioration automatique de contrastes des couleurs en cartographie. Application aux cartes de risques*. Thèse en sciences de l'information géographique, dir. Ruas A. COGIT, Université de Marne La Vallée, 2006, 370 p.

[CHE 07] Cheylan J-P., « Les processus spatio-temporels : quelques notions et concepts préalables à leur représentation ». Les dossiers de Mappemonde « Cartographie animée », n°87, 2007, 21 p.

[COM 04] Comby J. « La mise en carte et risques de dérives technocratiques dans la prévention des risques ». Risques Naturels et Aménagement en Europe. Armand Colin, 2004, pp 79-85.

[DAV 04] Davoine P-A., Martin H. et Cœur D. « Historical Flood Data Base Linked to a Web-Based Interface ». Systematic, Palaeoflood and Historical Data for the Improvement of Flood Risk Estimation (SPHERE), Methodological Guidelines, , 2004, pp. 95-101.

[DEC 97] Decrop G. « De l'expertise scientifique au risque négocié : le cas du risque en montagne ». Longjumeau : CEMAGREF Edition, 1997.

[DRA 00] Dragicevic S., Marceau D., « A fuzzy set approach for modelling time in GIS ». International Journal of Geographical Information Science, vol 14, n°3, 2000 pp 225-245.

[GRA 05] Grasland C., Martin H., Vincent J-M., Gensel. J., Mathian H., Oulahal S., Cuenot O., Edi E., Lizzi I., « Le projet Hypercarte : analyse spatiale et cartographie interactive ». Actes de colloque SAGEO 2005, 13p.

[GRI 06] Griethe H., Schuman H. « The visualization of uncertain data : methods and problems ». In Proceedings of simulation and visualization, Magdeburg, Germany, 2006.

[KRA 97] Kraak M-J., Edsall R. et MacEachren A-M. « Cartographic Animation and Legends for Temporal Maps: Exploration and or Interaction ». Proceedings of the 18th *International Cartographic Conference*, Stockholm, Sweden, 1997, pp. 253-260.

[KRA 01] Kraak M-J., « Web cartography : Developments and prospects« . http://www.kartografie.nl/webcartography/webbook, 2001.

[KRA 07] Kraak M-J. « Geovisualisation and Visual Analytics ». Vol 42, n°2, summer 2007, University of Toronto Press, 2007.

[LHO 03] L'Hostis A. « 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 », in Revue internationale de géomatique, vol. 13, n°1, 2003, pp. 69- 80.

[MAC 94] MacEachren A-M., « Time as a cartographic variable ». Visualization in Geographic Information Systems, Unwin D.J. Hearnshaw H.M. (Eds.), Wiley, 1994, pp.115-130.

[MAC 95] MACEACHREN, A. M. *How Maps Work: Representation, Visualization and Design*. Guilford Press, 1995.

[MAC 01] Mac Eachren A., Kraak M-J. « Research challenges in geovisualisation », Forthcoming in Cartography and Information Sciences. Vol 28, n°1, 2001, 11p.

[MAC 05] Mac Eachren A., Obinson A., Hopper S., Gardner S., Murray R. « Visualizing geospatial information uncertainly : What we know and what we need to know », in Cartography and Geographic Information Sciences. N°32(3), 2005, pp 130-160.

[MOI 07] Moisuc B. « Conception et mise en œuvre de systèmes d'informations spatio-temporels adaptatifs : le framework ACTIS ». Thèse de doctorat Université Joseph Fourier, Grenoble, 2007,192 p.

[NOR 03] Norton J_P., Brown J-D., Mysiak J. « To what extent, and how. Might uncertaintly be defined ? Comments engendered by « defining uncertainty : a conceptual basis for uncertainty management in model based décision support ». IAJ – The integrated (Eds) Walker & al, Integrated Assesment n°41 : 1, 2003. Assessment Journal, n°6 (1), pp 83-88.

[ORM 95] Ormeling, F.J. « Teaching animation cartography », in: Proceedings of the Seminar on Teaching Animated Cartography. Madrid, Spain, 1995.

[PET 94] Peterson M-P. « Spatial Visualization through Cartographic Animation: Theory and Practice », in Spatial Visualization through Cartographic Animation: Theory and Practice. Proceedings of Geographic Information Systems / Land Information Systems GIS/LIS, 1994, pp. 619-628.

[PET 99] Perterson, M-P. « Active legends for interactive cartographic animation ». Technical communication, in. J. Geographical information science, vol. 13, No. 4,1999, pp. 375-383.

[SLO 01] Slocum T-A., Blok C. Jiagng B., Koussoulakou A., Montello D-R., Fuhrmann S., Hedley N-R. « Cognitive and usability issues in geovisualization ». Cartograph. Geograph. Information Sciences, vol 28, 2001, pp61-75.

[ROL 00] Rolland-May C. « Evaluation des territoires : concepts, modèles, méthodes ». Paris, Hermès, 2000, 381 P.

[TEK 06] Tetaklian A. « La cartographie de l'aléa inondation à Sommières. La cartographie des risques naturels ». Rencontre Géo-risque, 7 février 2006, Montpellier .

[THO 01] Thomas I. « Cartographie d'aujourd'hui et de demain : rappels et perspectives ». Revue électronique Cybergeo, n°189, 2001, 23 P.

[THO 05] Thomson J. Hetzler E., Mac Eachren A., Gahegan M., Pavel M. « A typology for visualizing uncertainty ». Proc SPIE & IS&T Conf. Electronic Imaging, vol 5669 : Visalization and data analysis 2005, pp 146-157.

[WEG 96] Weger. « Cartographie : la couleur », cours ENSG-IGN, 1996, 25p.